

ASSE VIARIO MARCHE – UMBRIA E QUADRILATERO DI PENETRAZIONE INTERNA MAXI LOTTO 2

LAVORI DI COMPLETAMENTO DELLA DIRETTRICE PERUGIA ANCONA:
SS. 318 DI “VALFABBRICA”. TRATTO PIANELLO – VALFABBRICA
SS. 76 “VAL D’ESINO”. TRATTI FOSSATO VICO – CANCELLI E ALBACINA – SERRA SAN QUIRICO
“PEDEMONTANA DELLE MARCHE”, TRATTO FABRIANO – MUCCIA – SFERCIA

PROGETTO ESECUTIVO

<p>CONTRAENTE GENERALE:</p> 	<p><i>Il responsabile del Contraente Generale:</i></p> <p style="text-align: center;">Ing. Federico Montanari</p>	<p><i>Il responsabile Integrazioni delle Prestazioni Specialistiche:</i></p> <p style="text-align: center;">Ing. Salvatore Lieto</p>
--	---	--

PROGETTAZIONE: Associazione Temporanea di Imprese
Mandataria:

			
--	---	--	---

<p><i>RESPONSABILE DELLA PROGETTAZIONE PER L'ATI</i></p> <p style="text-align: center;">Ing. Antonio Grimaldi</p> <p><i>GEOLOGO</i></p> <p style="text-align: center;">Dott. Geol. Fabrizio Pontoni</p> <p><i>COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE</i></p> <p style="text-align: center;">Ing. Michele Curiale</p>			
---	---	--	---

<p><i>IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO</i></p> <p style="text-align: center;">Ing. Iginio Farotti</p>		
---	--	--

<p>2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE</p> <p>3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud</p> <p>4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia</p> <p>OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTI E PONTI</p> <p>Viadotto S. Anna: Relazione di calcolo sottostrutture</p>	<p><i>SCALA:</i></p> <hr/> <p><i>DATA:</i></p> <p style="text-align: center;">Settembre 2020</p>
--	--

Codice Unico di Progetto (CUP) F12C03000050021 (Assegnato CIPE 23-12-2015)

Codice Elaborato:

L	0	7	0	3	2	1	3	E	1	2	V	I	5	7	0	0	R	E	L	0	2	B
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

REV.	DATA	DESCRIZIONE	Redatto		Controllato	Approvato
B	Settembre 2020	Emissione a seguito istruttoria Anas	Progin	Progin	S.Lieto	A.Grimaldi
A	Marzo 2020	Emissione PE	Progin	Progin	S.Lieto	A.Grimaldi

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 2 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	-------------------------

INDICE

1. GENERALITA'	4
1.1 DESCRIZIONE DELL'OPERA	5
1.2 UNITÀ DI MISURA.....	9
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	9
3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI	10
3.1 RESISTENZE DI PROGETTO.....	10
3.1.1 Calcestruzzo C30/37.....	10
3.1.2 Calcestruzzo C32/40.....	10
3.1.3 Acciaio di armatura B450C.....	11
4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	12
4.1 INDAGINI GEOTECNICHE ESEGUITE.....	12
4.2 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO	12
4.3 RAPPORTO MOMENTO-TAGLIO IN TESTA AI PALI	13
5. ANALISI DEI CARICHI	15
5.1 PESO PROPRIO DELLA STRUTTURA E CARICHI PERMANENTI (G1, G2).....	15
5.1.1 Rinterro.....	15
5.2 EFFETTI DEI CEDIMENTI (E1).....	15
5.3 SOVRACCARICHI DA TRAFFICO (Q1, Q2).....	15
5.4 RITIRO DIFFERENZIALE SOLETTA-TRAVE (E2).....	17
5.5 VISCOSITÀ (E4)	18
5.6 VARIAZIONE TERMICA (E3).....	19
5.7 AZIONE DI FRENAMENTO (Q3).....	22
5.8 AZIONE CENTRIFUGA (Q4).....	22
5.9 AZIONE DEL VENTO (Q5)	22
5.10 AZIONI SISMICHE (Q6)	23
5.11 RESISTENZE PASSIVE DEI VINCOLI (Q7)	30
5.12 URTO DI VEICOLO IN SVIO (Q8)	30
5.13 SPINTE DELL COLTRE IN FRANA (CF)	31
6. COMBINAZIONI DI CARICO	33
6.1 GRUPPI DI CARICO.....	33
6.2 COEFFICIENTI PARZIALI E DI COMBINAZIONE	34
6.3 COMBINAZIONI AGLI SLU	35
6.4 COMBINAZIONI AGLI SLE.....	35
7. MODELLI DI CALCOLO	36
7.1 ORIGINE E CARATTERISTICHE DEI CODICI DI CALCOLO.....	36
7.2 MODELLO GLOBALE.....	37
7.3 MODELLI A MENSOLA PER LA VERIFICA DELLE SPALLE	38
7.3.1 Condizioni statiche.....	39
7.3.2 Condizioni sismiche	39
8. METODI DI ANALISI E DI VERIFICA	43

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id.doc.	N. prog.	Rev.	Pag. di Pag.
L0703	213	E	12	VI5700	REL	02	B	3 di 98

8.1	ANALISI STATICA	43
8.2	ANALISI SISMICA.....	43
8.2.1.1	<i>Isolatore viscoelastico lineare "equivalente"</i>	45
8.2.1.2	<i>Isolatori elastoplastici</i>	48
8.2.2	Analisi dinamica lineare (analisi modale)	51
8.2.2.1	<i>Risultati dell'analisi modale</i>	51
8.2.3	Analisi dinamica non lineare.....	55
8.2.3.1	<i>Risultati dell'analisi in direzione longitudinale</i>	56
8.2.3.2	<i>Risultati dell'analisi in direzione trasversale</i>	58
8.3	CRITERI GENERALI PER LE VERIFICHE STRUTTURALI.....	59
8.3.1	Verifiche allo SLU.....	59
8.3.2	Verifiche allo SLE.....	59
8.3.2.1	<i>Verifica di limitazione delle tensioni in esercizio</i>	59
8.3.2.2	<i>Verifica di fessurazione</i>	59
9.	VERIFICA DELLA SPALLA FISSA (S1).....	60
9.1	MURO FRONTALE.....	60
9.2	MURO PARAGHIAIA.....	63
9.3	MURI LATERALI.....	65
9.4	PLINTO DI FONDAZIONE.....	66
9.5	PALI DI FONDAZIONE	73
9.5.1	Verifiche geotecniche di capacità portante	73
10.	VERIFICA DELLA SPALLA MOBILE (S2)	75
10.1	MURO FRONTALE.....	75
10.2	MURO PARAGHIAIA.....	78
10.3	MURI LATERALI.....	79
10.4	PLINTO DI FONDAZIONE.....	80
10.5	PALI DI FONDAZIONE	84
10.5.1	Verifiche geotecniche di capacità portante	85
11.	VERIFICA DELLE PILE	86
11.1	RISULTATI DELLE ANALISI E VERIFICHE DEL FUSTO	86
11.1.1	Risultati e verifiche agli SLU/SLV	87
11.1.2	Risultati e verifiche agli SLE.....	88
11.2	PULVINO	89
11.3	PALI DI FONDAZIONE	90
11.3.1	Sollecitazioni testa pali.....	90
11.3.2	Verifiche geotecniche di capacità portante	93
11.3.3	Verifiche strutturale pali	93
11.4	PLINTO	94
12.	ISOLATORI, APPOGGI E GIUNTI	94
13.	VERIFICA DEI BAGGIOLI	97

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 4 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	-------------------------

1. GENERALITA'

La presente relazione viene emessa nell'ambito del Progetto Esecutivo della direttrice "Pedemontana delle Marche", che costituisce l'elemento di completamento tra le due direttrici "S.S.76" Vallesina e "S.S.77" Val di Chienti, con riferimento ai seguenti stralci funzionali:

- 3° stralcio funzionale: compreso tra lo svincolo di Castelraimondo nord e lo svincolo di Castelraimondo sud;
- 4° stralcio funzionale: compreso tra lo svincolo di Castelraimondo sud e l'innesto con la S.S. 77 a Muccia.

In particolare nel seguito si riportano le caratteristiche generali dell'opera, le modalità di calcolo, i risultati delle analisi delle sollecitazioni e le verifiche degli elementi strutturali delle sottostrutture del viadotto S. Anna, localizzato nel tratto compreso tra la pk 2+157.00 e la pk 2+255.00.

Le capacità portanti delle fondazioni sono riportate nella relazione specifica.

Per quanto concerne la verifica dell'impalcato, si rimanda all'elaborato:

L0703213E12VI5700REL01B (*Viadotto S. Anna - Relazione di calcolo impalcato*).

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 5 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	-------------------------

1.1 DESCRIZIONE DELL'OPERA

Il viadotto S. Anna è costituito da un'impalcato in calcestruzzo a 4 luci, il cui schema statico è quello di travi appoggiate-appoggiate, aventi il seguente spartito:

PONTI E VIADOTTI IN ACCIAIO-CLS			
OPERA	PROGRESSIVE	SPARTITO [m]	B _{imp} [m]
VIADOTTO S. ANNA	2+157 – 2+255	25+25+25+25	13.0

La sezione trasversale dell'impalcato presenta una larghezza complessiva di 13.0 m.

La campata è in c.a.p. ed è costituita da tre cassoncini prefabbricati e precompressi alti 1.6 m, ad interasse trasversale di 3.75 m.

Per maggiori dettagli riguardanti l'impalcato si rinvia alla relazione specifica.

Le sottostrutture consistono in due spalle e tre pile con fondazioni di tipo profondo su pali.

Sismicamente il viadotto si comporta come un impalcato continuo.

La spalla indicata con "S1" è la spalla fissa mentre quella indicata con "S2" è la spalla mobile. Il viadotto è dotato di un sistema di isolamento sismico dell'impalcato mediante dispositivi elastoplastici agenti in direzione longitudinale e trasversale all'asse viario; in particolare, sulla spalla fissa sono disposti isolatori longitudinali e trasversali mentre sulla spalla mobile e sulle pile sono disposti solo isolatori trasversali. La spalla fissa presenta un muro paraghiaia arretrato per permettere l'alloggiamento del sistema di isolamento.

Le pile hanno sezione pseudorettangolare cava biconnessa.

Di seguitosi riportano le principali caratteristiche geometriche delle sottostrutture.

Tabella 1 – Caratteristiche geometriche spalla S1

SPALLA FISSA S1

Altezza muro frontale: 6.7 m
 Spessore muro frontale: 2.50 m
 Altezza muro paraghiaia: 2.30 m
 Spessore muro paraghiaia: 0.80 m
 Spessore plinto di fondazione: 2.20 m
 Lunghezza plinto di fondazione: 12.0 m
 Larghezza plinto di fondazione: 14.0 m
 Spessori muri laterali: 1.5 m - 1.0 m - 0.5 m
 Pali: 9φ1500

Tabella 2 – Caratteristiche geometriche pila P1

PILA P1

Altezza totale pila: 11.8 m
 Altezza fusto: 9.4 m
 Altezza pulvino: 2.4 m
 Dimensione longitudinale base pila: 3.0 m
 Dimensione trasversale base pila: 7.0 m
 Spessore setti sezione cava: 0.40 m
 Spessore plinto di fondazione: 2.5 m
 Lunghezza plinto di fondazione: 7.5 m
 Larghezza plinto di fondazione: 12.0 m
 Pali: 6φ1500

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 6 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	-------------------------

Tabella 3 – Caratteristiche geometriche pilaP2

PILA P2

Altezza totale pila: 12.8 m

Altezza fusto: 10.4 m

Altezza pulvino: 2.4 m

Dimensione longitudinale base pila: 3.0 m

Dimensione trasversale base pila: 7.0 m

Spessore setti sezione cava: 0.40 m

Spessore plinto di fondazione: 2.5 m

Lunghezza plinto di fondazione: 7.5 m

Larghezza plinto di fondazione: 12.0 m

Pali: 6φ1500

Tabella 4 – Caratteristiche geometriche pilaP3

PILA P3

Altezza totale pila: 11.8 m

Altezza fusto: 9.4 m

Altezza pulvino: 2.4 m

Dimensione longitudinale base pila: 3.0 m

Dimensione trasversale base pila: 7.0 m

Spessore setti sezione cava: 0.40 m

Spessore plinto di fondazione: 2.5 m

Lunghezza plinto di fondazione: 7.5 m

Larghezza plinto di fondazione: 12.0 m

Pali: 6φ1500

Tabella 5 – Caratteristiche geometriche spalla S2

SPALLA MOBILE S2

Altezza muro frontale: 7.6 m

Spessore muro frontale: 2.50 m

Altezza muro paraghiaia: 2.36 m

Spessore muro paraghiaia: 0.50 m

Spessore plinto di fondazione: 2.20 m

Lunghezza plinto di fondazione: 12.0 m

Larghezza plinto di fondazione: 14.0 m

Spessori muri laterali: 1.5 m - 1.0 m - 0.5 m

Pali: 9φ1500

L'opera in oggetto è progettato per una vita nominale V_N pari a 50 anni. Gli si attribuisce inoltre una classe d'uso III ("Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza.") ai sensi del D. Min. 14/01/2008, da cui scaturisce un coefficiente d'uso $C_U = 1.5$. Da ciò si deduce un periodo di riferimento per l'azione sismica pari a 75 anni.

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id.doc.	N. prog.	Rev.	Pag. di Pag.
L0703	213	E	12	V15700	REL	02	B	7 di 98

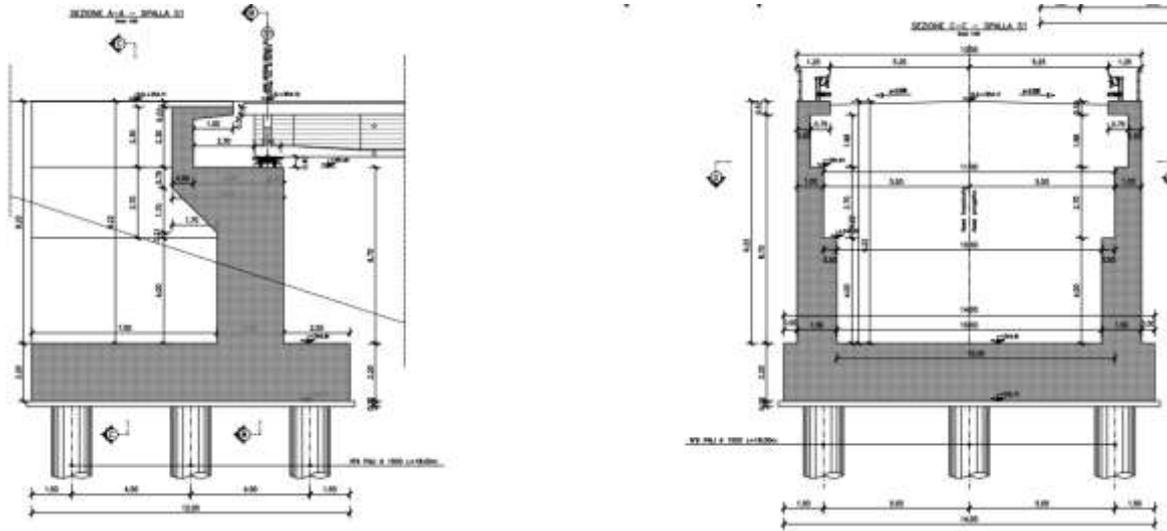


Figura 1 – Spalla S1

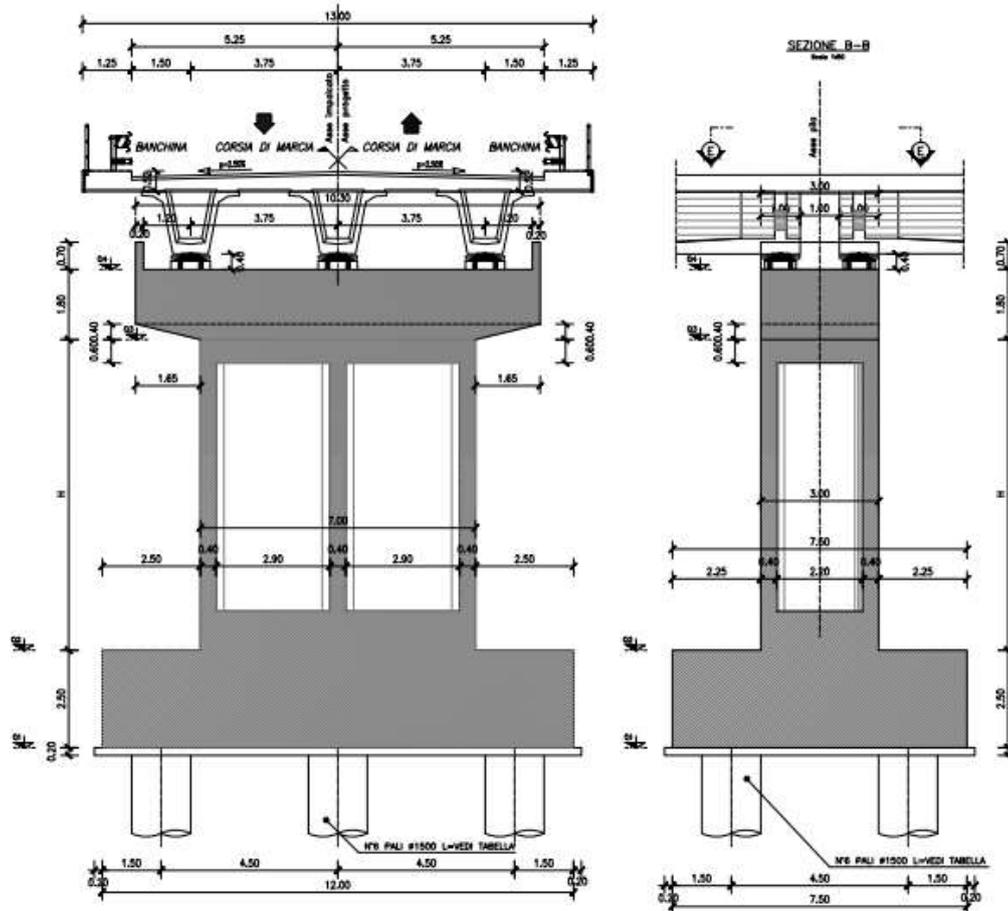


Figura 2 – Pile

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 8 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	------------------------

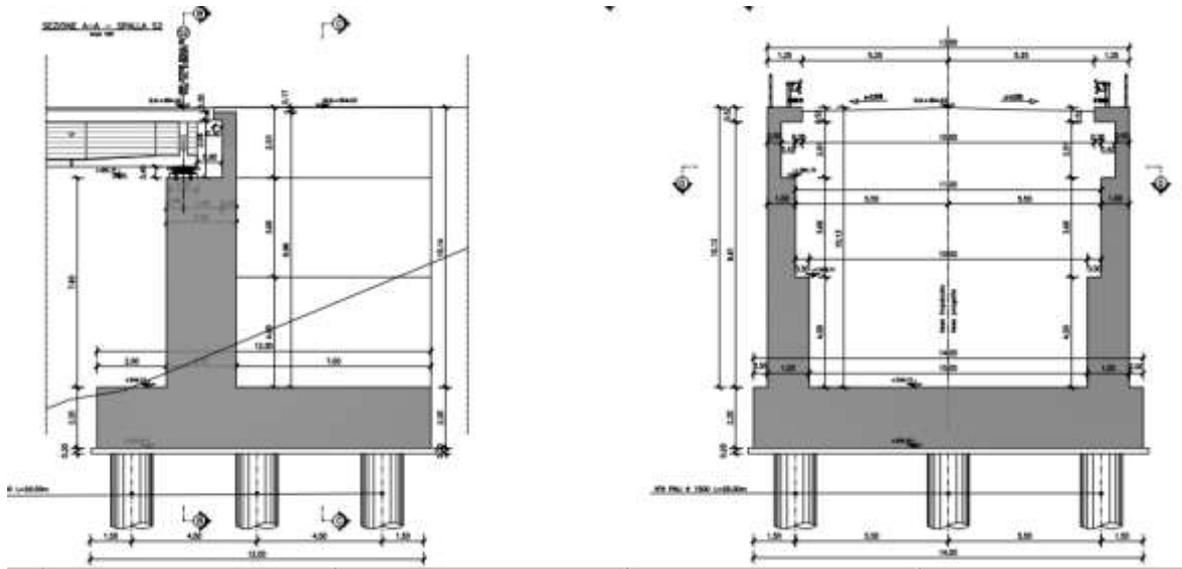


Figura 3 – Spalla S2

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 9 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	------------------------

1.2 UNITÀ DI MISURA

Nel seguito si adotteranno le seguenti unità di misura:

- per le lunghezze ⇒ m, cm, mm
- per i carichi ⇒ kN, kN/m², kN/m³
- per le azioni di calcolo ⇒ kN, kNm
- per le tensioni ⇒ MPa

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Nella redazione del progetto esecutivo si è fatto riferimento ai seguenti documenti normativi.

- D.M. 14/01/2008.
Norme tecniche per le costruzioni (NTC).
- Circolare del 02/02/2009.
Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. del 14/01/2008.
- UNI EN1993 -1-1.
EUROCODICE 2, parte 1.1. Progettazione delle strutture in calcestruzzo. Regole generali e regole per gli edifici.
- UNI EN1993 -1-1.
EUROCODICE 3, parte 1.1. Progettazione delle strutture in acciaio. Regole generali e regole per gli edifici.
- UNI EN1993 -1-2.
EUROCODICE 3. Parte 2. Progettazione delle strutture in acciaio. Ponti di acciaio.
- UNI EN 1998-1.
EUROCODICE 8, parte 1. Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici
- UNI EN 1998-2.
EUROCODICE 8, parte 2. Ponti.

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 10 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI

Le verifiche nel seguito espone tengono conto dei seguenti materiali per la realizzazione delle sottostrutture. Per i controlli si fa riferimento a quanto previsto dal DM 14/01/2008.

Tabella 6 – Calcestruzzi

Elemento	Classe
Calcestruzzo per magrone di fondazione	C12/15
Calcestruzzo per pali di fondazione	C32/40
Calcestruzzo armato per plinti di fondazione	C32/40
Elevazione Pile e Spalle	C30/37

Per le barre d'armatura del calcestruzzo si utilizza acciaio ad aderenza migliorata B450C.

3.1 RESISTENZE DI PROGETTO

3.1.1 Calcestruzzo C30/37

- | | |
|--|--|
| • $R_{ck} = 37 \text{ MPa}$ | resistenza caratteristica cubica a 28 giorni |
| • $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ | resistenza caratteristica cilindrica a 28 giorni |
| • $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 38 \text{ MPa}$ | resistenza cilindrica valore medio |
| • $f_{ctm} = 0.30 \cdot f_{ck}^{2/3} = 2.90 \text{ MPa}$ | resistenza media a trazione semplice (assiale) |
| • $f_{ctk} = 0.7 \cdot f_{ctm} = 2.03 \text{ MPa}$ | resistenza caratteristica a trazione |
| • $E_{cm} = 22000 [f_{cm}/10]^{0.3} = 32837 \text{ MPa}$ | modulo elastico |
| • $\gamma = 25.0 \text{ kN/m}^3$ | peso per unità di volume |

Resistenze di progetto allo SLU

- | | |
|---|---------------------------------------|
| • $f_{cd} = 0.85 \cdot f_{ck} / \gamma_c = 17.0 \text{ MPa}; \gamma_c = 1.50$ | resistenza di progetto a compressione |
| • $f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_c = 1.35 \text{ MPa}$ | resistenza di progetto a trazione |

Resistenze di progetto allo SLE

- | | |
|---|--|
| • $\sigma_{c,r} = 0.60 \cdot f_{ck} = 18.0 \text{ MPa}$ | tensione limite in comb. caratteristica (rara) |
| • $\sigma_{c,f} = 0.45 \cdot f_{ck} = 13.5 \text{ MPa}$ | tensione limite in comb. quasi permanente |
| • $\sigma_t = f_{ctm} / 1.2 = 2.42 \text{ MPa}$ | tensione limite di fessurazione (trazione) |

3.1.2 Calcestruzzo C32/40

- | | |
|--|--|
| • $R_{ck} = 40 \text{ MPa}$ | resistenza caratteristica cubica a 28 giorni |
| • $f_{ck} = 32 \text{ MPa}$ | resistenza caratteristica cilindrica a 28 giorni |
| • $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 40 \text{ MPa}$ | resistenza cilindrica valore medio |
| • $f_{ctm} = 0.30 \cdot f_{ck}^{2/3} = 3.02 \text{ MPa}$ | resistenza media a trazione semplice (assiale) |
| • $f_{ctk} = 0.7 \cdot f_{ctm} = 2.12 \text{ MPa}$ | resistenza caratteristica a trazione |
| • $E_{cm} = 22000 [f_{cm}/10]^{0.3} = 33346 \text{ MPa}$ | modulo elastico |
| • $\gamma = 25.0 \text{ kN/m}^3$ | peso per unità di volume |

Resistenze di progetto allo SLU

- | | |
|---|---------------------------------------|
| • $f_{cd} = 0.85 \cdot f_{ck} / \gamma_c = 18.1 \text{ MPa}; \gamma_c = 1.50$ | resistenza di progetto a compressione |
| • $f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_c = 1.41 \text{ MPa}$ | resistenza di progetto a trazione |

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 11 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

Resistenze di progetto allo SLE

- $\sigma_{c,r} = 0.60 \cdot f_{ck} = 19.2$ MPa tensione limite in comb. caratteristica (rara)
- $\sigma_{c,f} = 0.45 \cdot f_{ck} = 14.4$ MPa tensione limite in comb. quasi permanente
- $\sigma_t = f_{ctm}/1.2 = 2.52$ MPa tensione limite di fessurazione (trazione)

3.1.3 Acciaio di armatura B450C

- $f_{yk} = 450$ MPa resistenza caratteristica di snervamento
- $f_{tk} = 540$ MPa resistenza caratteristica a rottura
- $E_s = 210000$ MPa modulo elastico

Resistenza di progetto allo SLU

- $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = 391$ MPa; $\gamma_s = 1.15$ resistenza di progetto a compressione

Resistenza di progetto allo SLE

- $\sigma_{s,r} = 0.80 \cdot f_{yk} = 360$ MPa tensione limite in comb. rara

Tuttavia, i materiali impiegati per la realizzazione delle sottostrutture sono riepilogati nell'apposita tabella progettuale (rif. elab. L0703211E12VI3200TVI03) e presentano caratteristiche di resistenza e qualità uguali o superiori a quelli dichiarati nella presente relazione e a favore di sicurezza assunti nelle verifiche statiche.

4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Nel presente paragrafo si riporta la caratterizzazione geotecnica specifica per l'opera in esame. Per dettagli si rimanda alla *Relazione Geotecnica Generale*

4.1 INDAGINI GEOTECNICHE ESEGUITE

Le indagini più prossime all'opera in oggetto sono le seguenti:

- prova penetrometrica dinamica DPSH P24 di lunghezza 13.0 m, appartenente alla campagna d'indagine del 2000;
- sondaggio BH17 di lunghezza 25.0 m, appartenente alla campagna del 2004;
- sondaggio X3.9 di lunghezza 27.0 m, appartenente alla campagna del 2017.

Il sondaggio BH17 è stato attrezzato con piezometro del tipo a tubo aperto, mentre il sondaggio X3.9 con inclinometro.

Nella carta geomorfologica in corrispondenza della spalla 1 è segnalato un piccolo movimento franoso ed in corrispondenza delle pile 2 e 3 è segnalata una frana PAI R1-P1 (codice F-16-0945). Si tratta di piccoli corpi di frana quiescente che interessano le coltri superficiali coesive.

L'inclinometro X3.9 è stato collocato più a monte del tracciato, per problematiche di accesso ed evidenzia un piccolo movimento (5 mm) che interessa uno spessore di 5 m circa che coinvolge una scarpata delimitata dai fossi di scolo della zona.

Nel caso in esame lo spessore della coltre coinvolta da movimento, interessa eventualmente il plinto di fondazione ma non i pali di fondazione. Comunque cautelativamente nella portanza pali di queste fondazioni, si considera la quota testa palo a p.c. (come se il terreno fino a testa palo non fosse presente).

4.2 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO

La stratigrafia in corrispondenza delle sottostrutture del viadotto è indicata nelle tabelle seguenti.

Tabella 7 – Stratigrafia 1 e parametri geotecnici di calcolo (SPALLE e PILE)

Unità geotecnica	Profondità [m da p.c.]	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	c_u [kPa]	τ [kPa]	q_b [kPa]
a – coltri di frana quiescente	0.0÷5.0	19.0	-	50	$\alpha \cdot c_u \leq 100$	$9 \cdot c_u + \sigma_v$
Ecla – Depositi eluvio-colluviali limoso-argillosi	5.0÷13.0	19.0	-	100÷130	$\alpha \cdot c_u \leq 100$	$9 \cdot c_u + \sigma_v$
Salt – Alterazione del substrato	13.0÷15.5	20.0	-	250	$\beta \cdot \sigma'_v \leq 120$ con $\beta = 0.1 + 0.4 \cdot c_u / \sigma'_v$	$9 \cdot c_u + \sigma_v$
S – Substrato pelitico arenaceo	>15.5	23.0	-	-	150 per $z \leq 18.5$ m 170 per $z > 18.5$ m	4000 per $z \leq 18.5$ m 5000 per $z > 18.5$ m
Falda: a p.c.						

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id.doc.	N. prog.	Rev.	Pag. di Pag.
L0703	213	E	12	V15700	REL	02	B	13 di 98

Per ulteriori dettagli relativi alla stratigrafia, ai parametri geomeccanici di progetto, all'individuazione delle zone in frana e alle curve di capacità portante dei pali si rimanda alla relativa relazione di calcolo delle fondazioni.

4.3 RAPPORTO MOMENTO-TAGLIO IN TESTA AI PALI

Per la valutazione dello sforzo nei pali (effetto della deformabilità a taglio degli stessi pali) e del momento flettente agente in testa al palosi è utilizzato un parametro α [m] definito come rapporto tra momento e taglio in testa al palo nell'ipotesi di rotazione impedita. In particolare lo sforzo normale nei pali è quindi calcolato come segue:

$$N_i = \frac{N_{Ed}}{n} \pm \frac{(M_{Ed} + \sum_i M_i(S_{Ed}))d_i}{\sum_i d_i^2}$$

Le azioni di taglio sono suddivise equamente tra i pali, mentre il momento agente a quota testa pali è direttamente proporzionale al taglio mediante un coefficiente α (espresso in metri):

$$M_i(V_{Ed}) = \alpha \frac{V_{Ed}}{n}$$

Il coefficiente α dipende principalmente dalle caratteristiche di rigidità relative palo-terreno e, generalmente, fornisce un valore del momento sollecitante conservativo. Il valore adottato è riportato nella seguente tabella.

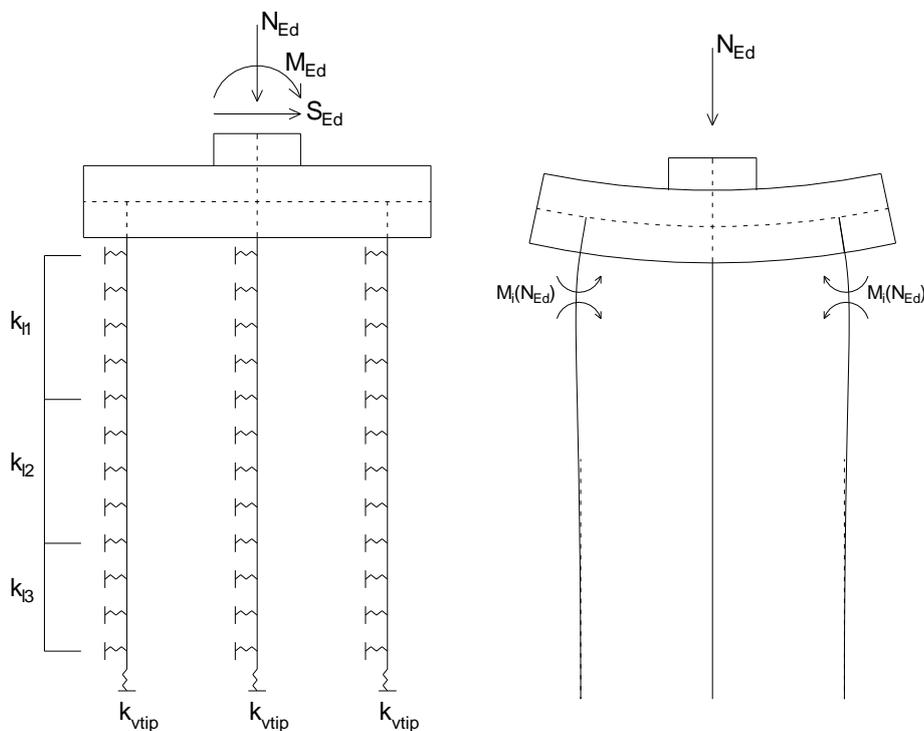


Figura 4 - Modello del plinto su pali ed effetto flessionale su pali dovuto al carico assiale agente sul plinto (a destra)

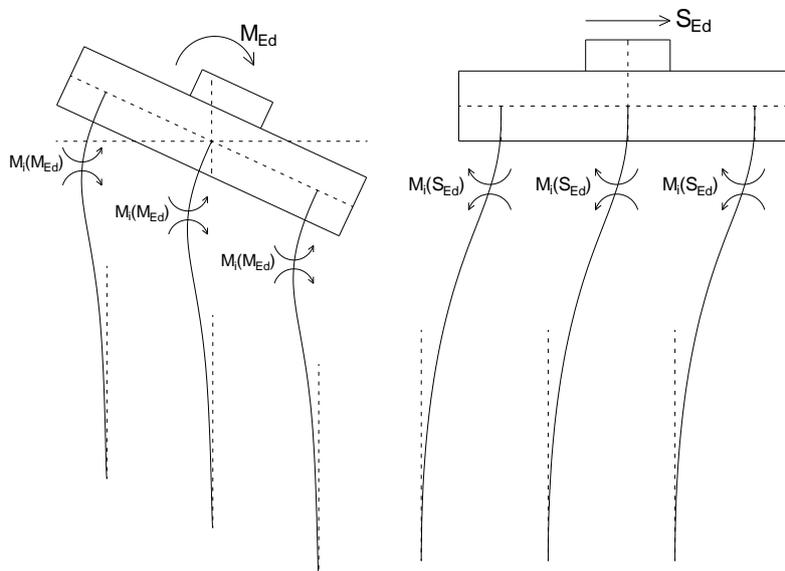


Figura 5 - Effetto flessionale sui pali dovuti al momento flettente (a sinistra) e al taglio (a destra) agenti sul plinto

Nella seguente Tabella 8 è riportato, in funzione del diametro del palo e per una lunghezza del palo media indicativa di calcolo, il valore del parametro α per il calcolo del momento flettente a testa palo. Per i metodi di valutazione di tale parametro si rimanda alla Relazione Geotecnica Generale sulle Opere all'aperto e Gallerie Artificiali.

Tabella 8 – Valori α

Opera	Diametro palo [mm]	Lunghezza palo [mm]	Parametro α [m]
Viadotto S. Anna	1500	20.0	3.28
		30.0	3.31

5. ANALISI DEI CARICHI

5.1 PESO PROPRIO DELLA STRUTTURA E CARICHI PERMANENTI (G1, G2)

Peso proprio dei cassoncini in c.a.p. (G1.1), calcolato in automatico dal software di calcolo assumendo un peso specifico del calcestruzzo armato pari a 25 kN/m³. Il peso degli elementi di carpenteria principale

$$G1.1 = 19.55 \text{ kN/m}$$

Peso della soletta (G1.2), considerando uno spessore di 30 cm, per una larghezza complessiva di piattaforma pari a 11.2 m:

Il peso della soletta per metro quadro è pari a: **$0.365 \times 1 \times 1 \times 25 = 9.125 \text{ kN/mq}$**

Carichi permanenti portati (G2)

I carichi permanenti portati agenti sulla struttura di impalcato sono:

Pavimentazione	G2.1 = 11.2 x 3 kN/m	33.6 kN/m
Guard Rail	G2.2 = 2 x 1.25 kN/m	2.50 kN/m
Velette	G2.3 = 2 x 1.0 kN/m	2.00 kN/m
Corrimano	G2.4 = 2 x 0.5 kN/m	1.00 kN/m
Impianti	G2.5 = 2 x 1.0 kN/m	2.00 kN/m
Totale	G2	41.1 kN/m

5.1.1 Rinterro

Per il terreno di rinterro a tergo della spalla si è considerato un peso per unità di volume pari a 20 kN/m³.

Sui plinti di fondazione delle pile si è considerato uno strato di terreno avente spessore di 1 metro, applicato come forza concentrata in testa al plinto nel modello agli elementi finiti.

5.2 EFFETTI DEI CEDIMENTI (E1)

Nel caso in esame, essendo le fondazioni dell'opera realizzate su pali, l'effetto dei cedimenti sull'opera risulta trascurabile.

5.3 SOVRACCARICHI DA TRAFFICO (Q1, Q2)

Coerentemente con quanto indicato al p.to 5.1.3.3.3 del D. M.14/01/2008, i sovraccarichi da traffico, relativamente allo "schema di carico 1", sono schematizzati mediante colonne di carico costituite, come riportato nelle figure seguenti, da forze concentrate e da carichi uniformemente distribuiti.

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS V5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 16 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	--------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

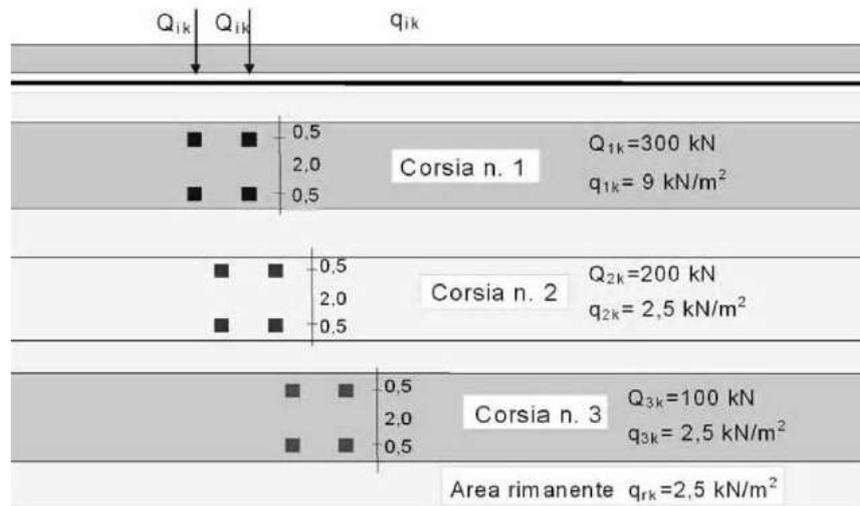


Figura 6 Schema di carico 1

Nel caso in oggetto si impiegano quattro corsie di carico costituite da:

una colonna di carichi (ingombro = 3 m) costituita da un automezzo convenzionale Q_{1k} di 600 kN dotato di 2 assi di 2 ruote ciascuno, distanti 1.20 m in senso longitudinale e con interasse ruote in senso trasversale di 2.00 m; un carico ripartito q_{1k} di 9 kN/m² uniformemente distribuito;

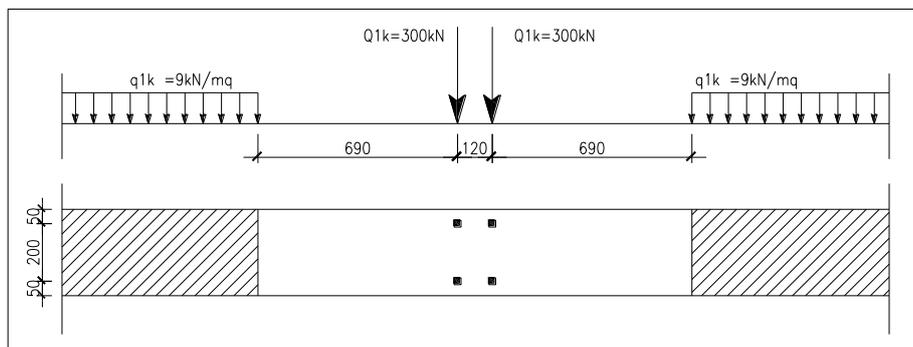
una seconda colonna di carichi (ingombro = 3 m), analoga alla precedente, ma con carichi pari rispettivamente a 400 kN di Q_{1k} e 2.5 kN/m² di q_{1k} e posta ad interasse di 3.00 m. da essa;

una terza colonna di carichi (ingombro = 3 m), analoga alla precedente, ma con carichi pari rispettivamente a 200 kN di Q_{1k} e 2.5 kN/m² di q_{1k} e posta ad interasse di 3.00 m. da essa;

una colonna di carico (ingombro = 2.2 m) $q_{rk} = 2.5$ kN/m² nella zona di carreggiata non impegnata dai carichi precedenti.

Carico da Folla

Sul marciapiede, il carico $q_{fk} = 5$ kN/m² da considerare al 50 % nelle combinazioni in cui sono presenti i carichi stradali.



2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 17 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

Figura 7 Prima colonna di carico

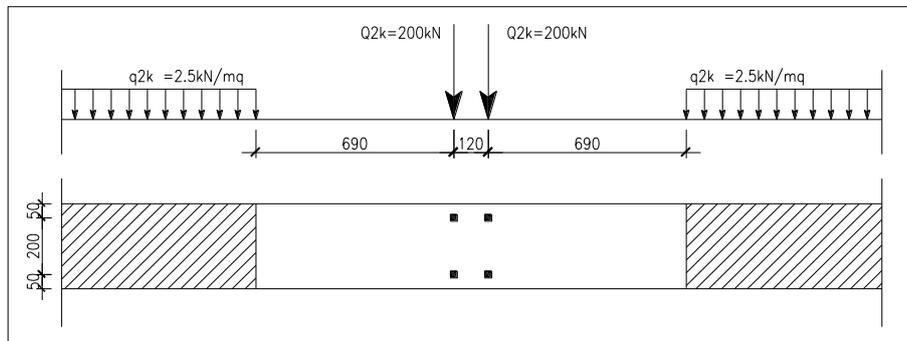


Figura 8 Seconda colonna di carico

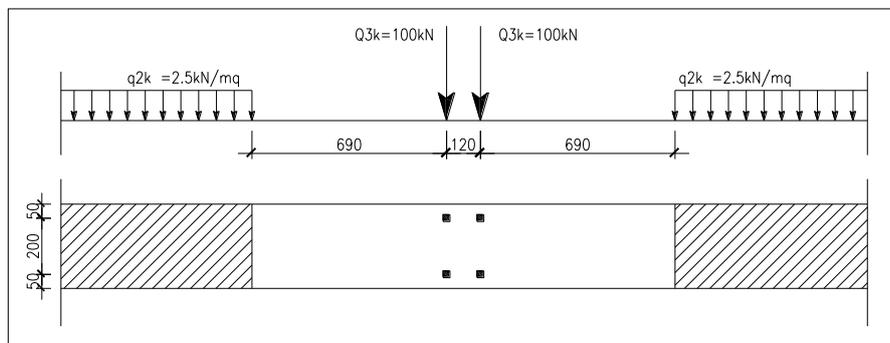


Figura 9 Terza colonna di carico

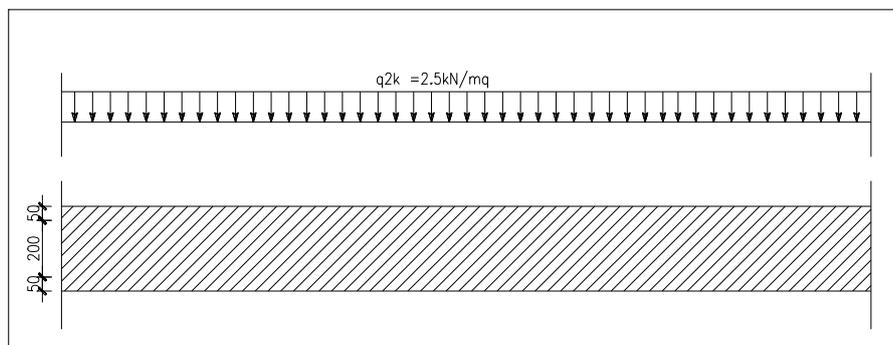


Figura 10 Quarta colonna di carico (area rimanente)

5.4 RITIRO DIFFERENZIALE SOLETTA-TRAVE (E2)

Il calcolo delle deformazioni da ritiro nella soletta è stato eseguito secondo quanto specificato nel Decreto Ministeriale 14/01/2008.

Si riporta la valutazione della deformazione da ritiro secondo le indicazioni previste dalle norme.

f_{ck} =	35	Mpa	<i>Resistenza Caratteristica Cilindrica a Compressione</i>
UR=	60	%	<i>Umidità Relativa</i>
ε_{co} =	-0.500		<i>Deformazione per Ritiro da Essiccamento</i>
A_c =	3.13	m ²	<i>Area della Sezione in Conglomerato</i>
u=	12.55	m	<i>Perimetro della Sezione in Conglomerato esposto all'Aria</i>
h_0 =	500	mm	<i>Dimensione Fittizia pari al rapporto $2A_c/u$</i>

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

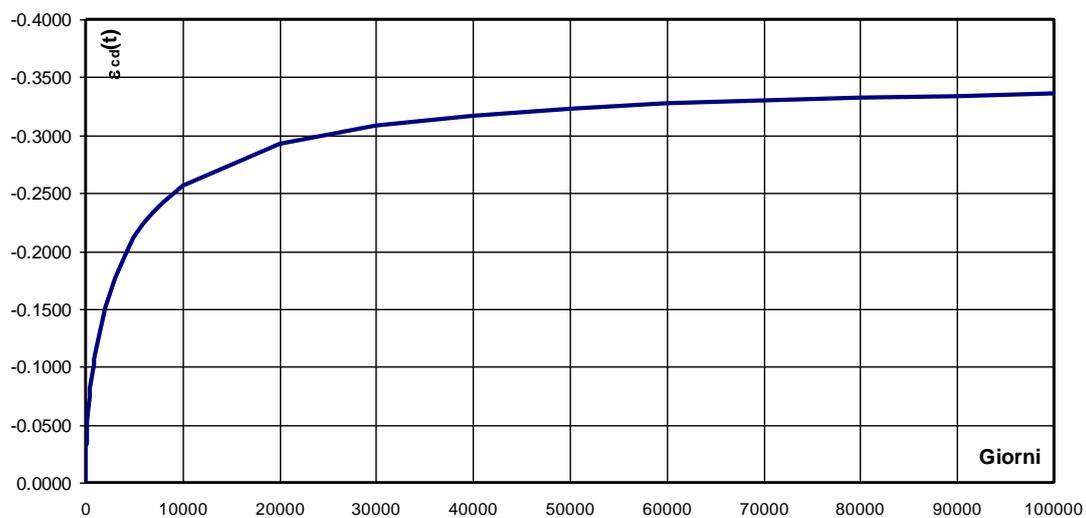
4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 18 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

$k_h =$	0.700	
$\varepsilon_{cd, \infty} =$	-0.350	<i>Deformazione per Ritiro da Essiccamento (a Tempo infinito)</i>
$\varepsilon_{ca, \infty} =$	-0.000063	<i>Deformazione per Ritiro da Autogeno (a Tempo infinito)</i>
$\varepsilon_{cs} =$	-0.350 ‰	<i>Deformazione per Ritiro Totale (a Tempo infinito)</i>
SVILUPPO NEL TEMPO DELLA DEFORMAZIONE $\varepsilon_{cd}(t)$		
$t =$	50000 gg	<i>Età del calcestruzzo al tempo massimo</i>
$t_s =$	0.00 gg	
$\beta_{ds}(t-t_s) =$	0.92	<i>Funzione di sviluppo Temporale</i>
$\varepsilon_{cd}(t) =$	-0.323 ‰	<i>Deformazione per Ritiro da Essiccamento (al Tempo t)</i>



La valutazione riportata indica che a 50.000 gg, per un tempo superiore alla vita utile della struttura, la deformazione da ritiro raggiunge il valore 0.323‰.

Come precedentemente evidenziato si prevede l'utilizzo di additivo antiritiro idoneo a contenere la deformazione massima al valore di 0.2‰.

5.5 VISCOSITÀ (E4)

Di seguito si riporta il calcolo del coefficiente di viscosità per il calcestruzzo della soletta secondo quanto specificato nel Decreto Ministeriale 14/01/2008.

$h_0 =$	500 mm	<i>Dimensione Fittizia pari al rapporto $2A_c/u$</i>
$t_0 =$	4 giorni	<i>Età del calcestruzzo al Momento della messa in Carico</i>
$f_{ck} =$	35 Mpa	<i>Resistenza Caratteristica Cilindrica a Compressione</i>
$f_{cm} =$	43 Mpa	<i>Resistenza Media Cilindrica a Compressione (a 28 gg)</i>
UR =	60 %	<i>Umidità Relativa</i>
$\phi(t_\infty, t_0) =$	3.5	<i>Coefficiente di Viscosità a $t = \infty$</i>
SVILUPPO NEL TEMPO DEL COEFFICIENTE DI VISCOSITA' $\phi(t, t_0)$		
$t =$	50000 gg	<i>Età del calcestruzzo al tempo massimo</i>
$\alpha_1 =$	0.87	
$\alpha_2 =$	0.96	<i>Coefficienti dipendenti dalla resistenza del calcestruzzo</i>
$\alpha_3 =$	0.90	
$\phi_{RH} =$	1.38	<i>Coefficiente dipendente dall'umidità relativa</i>
$\beta(f_{cm}) =$	2.56	<i>Coefficiente dipendente dalla resistenza del calcestruzzo</i>

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 19 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

$$\beta(t_0) = 0.70$$

$$\phi_0 = 2.5$$

$$\beta_H = 975.548427$$

$$\beta_{cc}(t-t_0) = 0.99$$

$$\phi(t, t_0) = 2.5$$

Coefficiente dipendente dall'età del Calcestruzzo

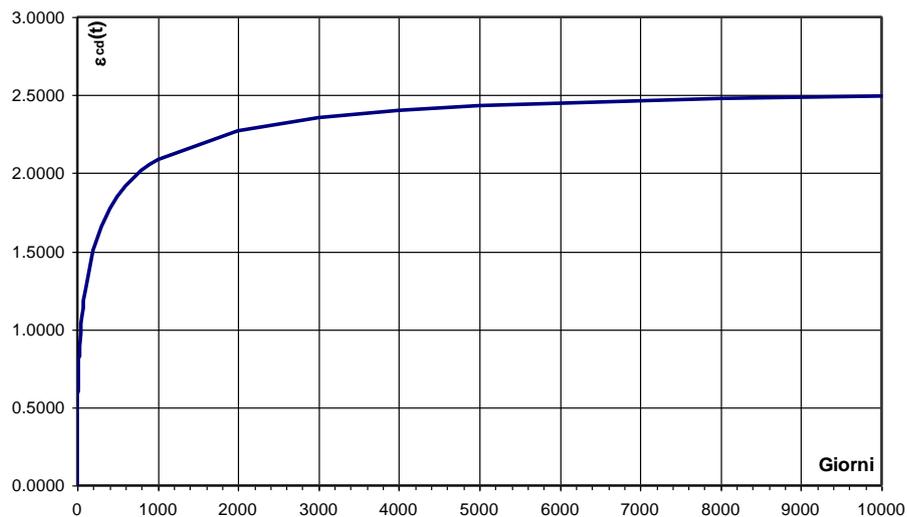
al momento dell'applicazione del carico

Coefficiente Nominale di Viscosità

Coefficiente dipendente da UR e da h_0

Coefficiente descrittivo dell'evoluzione della viscosità nel tempo

Coefficiente di Viscosità al tempo $t = 10.000$



5.6 VARIAZIONE TERMICA (E3)

L'azione della variazione termica è valutata, in termini di temperatura massima estiva e minima invernale dell'aria nel sito della costruzione, con periodo di ritorno di 50 anni, attraverso le indicazioni generali fornite dal DM 2008 (punto 3.5.1) e quelle specifiche contenute nella UNI EN 1991-1-5.

In dettaglio, è stata valutata una variazione termica uniforme pari a $\pm 25^\circ\text{C}$ lungo tutto lo sviluppo dell'opera. Tale valore è stato definito come di seguito illustrato.

In prima analisi, sono state determinate la minima e la massima temperatura dell'aria all'ombra. Queste grandezze, funzione della posizione geografica, sono ricavate dalle mappe nazionali delle linee isoterme, presenti nell'Appendice Nazionale, 2007 della UNI EN 1991-1-1 e di seguito riportate:

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 20 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

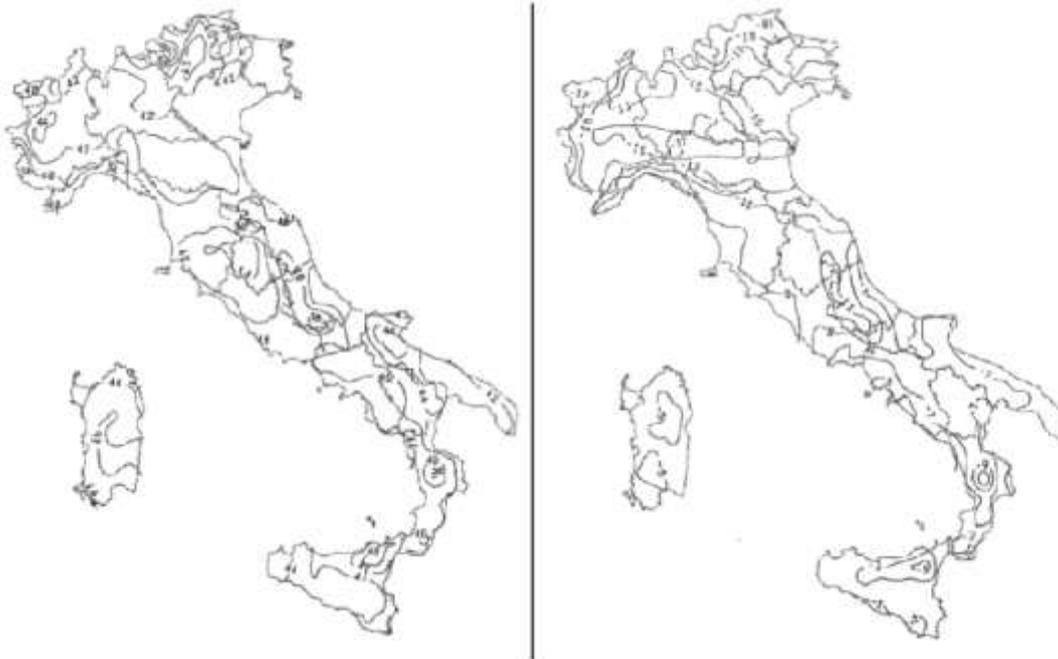


Figura 11: Mappe nazionali delle linee isotermitiche; T_{max} a sinistra e T_{min} a destra (*Appendici nazionali, 2007*)

Per il sito in cui sorge il viadotto in esame i valori forniti dalle isoterme sono:

$T_{max} = 40^\circ$

$T_{min} = -11^\circ$

Questi valori hanno un periodo di ritorno pari a 50 anni (probabilità annuale di essere superati pari a 0,02); inoltre si riferiscono al livello medio dei mari. Per ottenere dei valori propri per la zona in cui sorge il viadotto in esame, occorre modificarli come proposto dalla normativa:



Figura 12: Zone climatiche italiane (*Appendice A, UNI EN 1991-1-5*)

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id.doc.	N.prog.	Rev.	Pag.di Pag.
L0703	213	E	12	V15700	REL	02	B	21 di 98

Poiché il viadotto in esame ricade nella zona climatica 2, i valori massimi e minimi dell'aria all'ombra sono i seguenti:

$T_{min, h} = -13 \text{ } ^\circ\text{C}$

$T_{max, h} = +39 \text{ } ^\circ\text{C}$

a cui corrispondono, per ponti di gruppo 3 (tipologia impalcato di calcestruzzo), i seguenti valori riferiti alla struttura:

$T_{e, min} = -5 \text{ } ^\circ\text{C}$

$T_{e, max} = +40 \text{ } ^\circ\text{C}$

Tali valori sono estrapolati dal grafico riportato di seguito e contenuto nell' Eurocodice EN 1991-1-5.

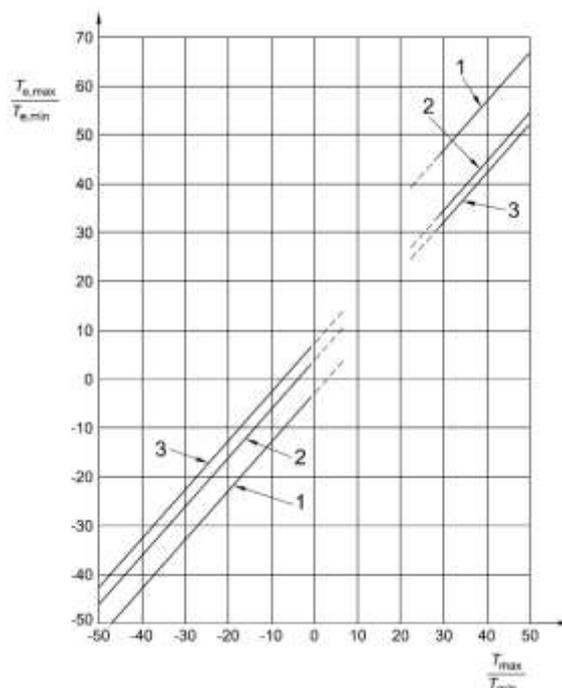


Figura 13: Correlazione tra temperatura dell'aria all'ombra minima/massima (T_{min}/T_{max}) e componente di temperatura uniforme del ponte minima/massima ($T_{e.min}/T_{e.max}$)

Come temperatura di riferimento (T_0), cioè temperatura dell'istante in cui la struttura è stata vincolata, la normativa propone:

$T_0 = 15^\circ$

In definitiva quindi si assume l'escursione termica uniforme:

$\Delta T_N \text{ comp} = -25 \text{ } ^\circ\text{C}$

$\Delta T_N \text{ exp} = +25 \text{ } ^\circ\text{C}$

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 22 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

Oltre la variazione termica uniforme, è stata considerata anche una differenza di temperatura di 5°C con andamento a farfalla tra la soletta e la trave.

5.7 AZIONE DI FRENAMENTO (Q3)

Secondo il D.M. 14/01/2008 l'azione longitudinale di frenamento è funzione del carico verticale totale agente sulla corsia convenzionale n. 1, ed è uguale a:

$$180kN \leq q_3 = 0.6(2 \cdot Q_{1k}) + 0.1 \cdot q_{1k} \cdot w_1 \cdot L \leq 900kN$$

Nel caso in oggetto risulta $Q_3 = 427.5 \text{ kN} = 17.1 \text{ kN/m}$.

L'azione di frenatura è applicata convenzionalmente a quota pavimentazione.

5.8 AZIONE CENTRIFUGA (Q4)

L'azione centrifuga per ogni colonna di carico è valutata convenzionalmente come segue:

$$R < 60 \text{ m} \quad q_4 = 5.00 \text{ kN/m}$$

$$60 \text{ m} \leq R \leq 1500 \text{ m} \quad q_4 = 300/R \text{ kN/m}$$

$$1500 \text{ m} \leq R \quad q_4 = 0.00 \text{ kN/m}$$

Per il viadotto in esame l'azione centrifuga è nulla in quanto l'impalcato si sviluppa in rettilineo.

5.9 AZIONE DEL VENTO (Q5)

L'azione del vento viene convenzionalmente assimilata ad un carico orizzontale statico, diretto ortogonalmente all'asse del ponte.

La superficie dei carichi transitanti esposta al vento si assimila ad una parete rettangolare continua dell'altezza di 3.m a partire dal piano stradale.

Si riporta di seguito il calcolo della pressione del vento per unità di superficie.

Si valuta la pressione del vento in accordo con il paragrafo 3.3 del DM. 14/01/2008. La pressione del vento è data dall'espressione:

$$p = q_b \cdot c_e \cdot c_p \cdot c_d,$$

dove:

q_b = è la pressione cinetica di riferimento;

c_e = è il coefficiente di esposizione;

c_p = è il coefficiente di forma o aerodinamico;

c_d = è il coefficiente dinamico.

Con:

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 23 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

$$q_b = \rho \cdot (v_b)^2 / 2 = 456 \text{ N/m}^2;$$

dove v_b è stato desunto dalla tabella 3.3.I, zona 3 (Marche, Umbria) e ρ è la densità dell'aria, assunta pari a 1.25 kg/m^3 .

Considerando una classe di rugosità D (tabella 3.3.III), l'altezza del sito sul livello del mare, dalla figura 3.3.2 si evince che la struttura si trova in categoria II e dunque, in accordo con la tabella 3.3.II si assumono i seguenti parametri:

$$k_r = 0.19;$$

$$z_0 = 0.05 \text{ m};$$

$$z_{\min} = 4 \text{ m}.$$

quindi ipotizzando che l'opera abbia altezza $z \approx 10 \text{ m}$ dal suolo risulta:

$$c_e(z) = k^2 c_t \ln(z/z_0) [7 + c_t \ln(z/z_0)] = 2.36.$$

Secondo le indicazioni della Circolare del 02/02/2009 "Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. del 14/01/2008" (par. C3.3.10.4), si determina il coefficiente aerodinamico per l'impalcato in esame:

$$c_p = 2.4 - \phi = 1.4, \text{ essendo per travi ad anima piena } \phi = 1$$

Si considera un coefficiente dinamico (c_d) cautelativamente pari a 1 (par. 3.3.8 D.M. 14/01/2008). Procedendo al calcolo della pressione si ottiene:

$$p = q_b \cdot c_e \cdot c_p \cdot c_d = 456 \text{ N/m}^2 \times 2.36 \times 1.4 \times 1 = 1.51 \text{ kN/m}^2$$

A vantaggio di sicurezza si assume comunque una pressione da vento pari a 2.5 kN/m^2

Vento a ponte carico

Cautelativamente si considera su tutto il ponte la sagoma dei veicoli per un'altezza pari a 3.0 al di sopra della livelletta.

$$q_w = (1.6 + 0.45 + 3.00) \times 2.5 \text{ kN/m} = 12.6 \text{ kN/m}.$$

Vento a ponte scarico

Cautelativamente questa condizione di carico si considera coincidente con la precedente.

5.10 AZIONI SISMICHE (Q6)

Il viadotto in oggetto è progettato per una vita nominale V_N pari a 50 anni. Gli si attribuisce inoltre una classe d'uso III ("Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza.") ai sensi del D. Min. 17/01/2018, da cui scaturisce un coefficiente d'uso $C_U = 1.5$.

L'azione sismica di progetto è valutata a partire dalla pericolosità sismica di base del sito su cui l'opera insiste, descritta in termini geografici e temporali:

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 24 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

- attraverso i valori di accelerazione orizzontale di picco a_g (attesa in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale) e le espressioni che definiscono le ordinate del relativo spettro di risposta elastico in accelerazione $S_e(T)$;
- in corrispondenza del punto del reticolo che individua la posizione geografica dell'opera;
- con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} .

In particolare, la forma spettrale prevista dalla normativa è definita, su sito di riferimento rigido orizzontale, in funzione di tre parametri:

- a_g , accelerazione orizzontale massima del terreno
- F_0 , valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
- T_c^* , periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

I suddetti parametri sono calcolati come media pesata dei valori assunti nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento che contiene il punto caratterizzante la posizione dell'opera, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici.

In particolare, si può notare come F_0 descriva la pericolosità sismica locale del sito su cui l'opera insiste. Infatti, da quest'ultimo, attraverso le espressioni fornite dalla normativa, sono valutati i valori d'amplificazione stratigrafica e topografica. Di seguito sono riassunti i valori dei parametri assunti per l'opera in oggetto.

- Vita nominale V_N = 50 anni;
- Classe d'uso = III;
- Coefficiente d'uso C_u = 1.5;
- Periodo di riferimento V_R = 75 anni;
- $T_{R,SLV}$ = 712 anni;
- Comune = Camerino;
- $a_{g,SLV}$ = **0.220 g**;
- $F_{0,SLV}$ = **2.544**;
- $T_{c,SLV}^*$ = **0.333 sec.**

Tabella 9 - Accelerazione (a_g), fattore (F_0) e periodo (T_c^*) per comune di riferimento: Matelica

V_R [anni]	Stato Limite	PV_R -	T_R [anni]	a_g [g]	F_0 [-]	T_c^* [s]
75	SLO	81%	45	0.078	2.44	0.285
	SLD	63%	75	0.097	2.433	0.295
	SLV	10%	712	0.220	2.544	0.333
	SLC	5%	1462	0.277	2.584	0.343

Lo spettro di risposta elastico per la descrizione della componente orizzontale del moto sismico è infine costruito a partire dai parametri seguenti.

- Categoria di suolo = C;
- Categoria topografica = T1;
- S_s , fattore stratigrafico = 1.364;
- S_T , fattore topografico = 1.00;



2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 25 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

- C_c , fattore correttivo del periodo T_c^* = 1.510.

Si riportano nell'immagine seguente, a titolo di riferimento, gli *spettri elastici allo SLD, SLV e SLC* in accelerazione in direzione orizzontale e verticale.

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 26 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

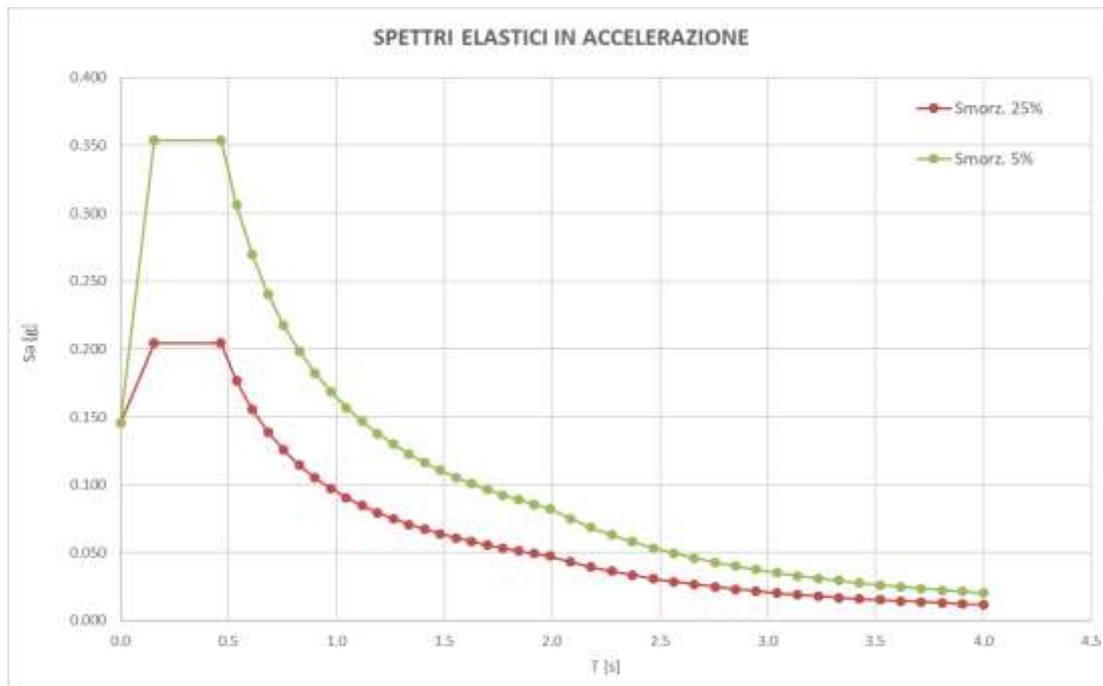


Figura 14 – Spettri elastici in accelerazione allo SLD

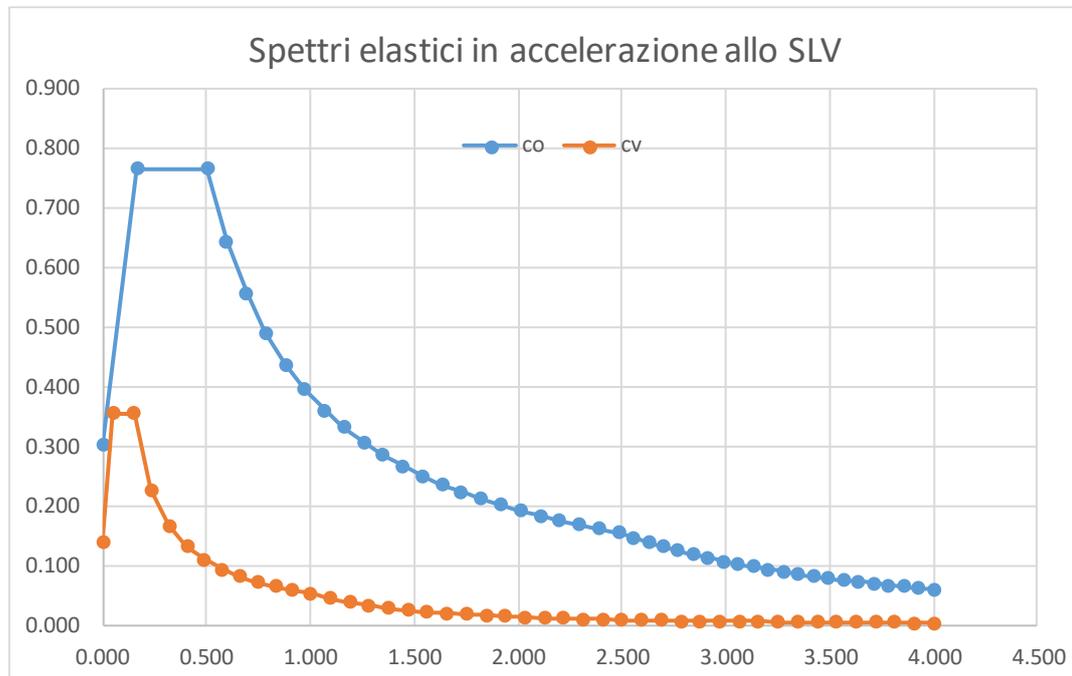


Figura 15 – SLV: Spettri elastici in accelerazione ($q = 1$)

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id.doc.	N. prog.	Rev.	Pag. di Pag.
L0703	213	E	12	VI5700	REL	02	B	27 di 98

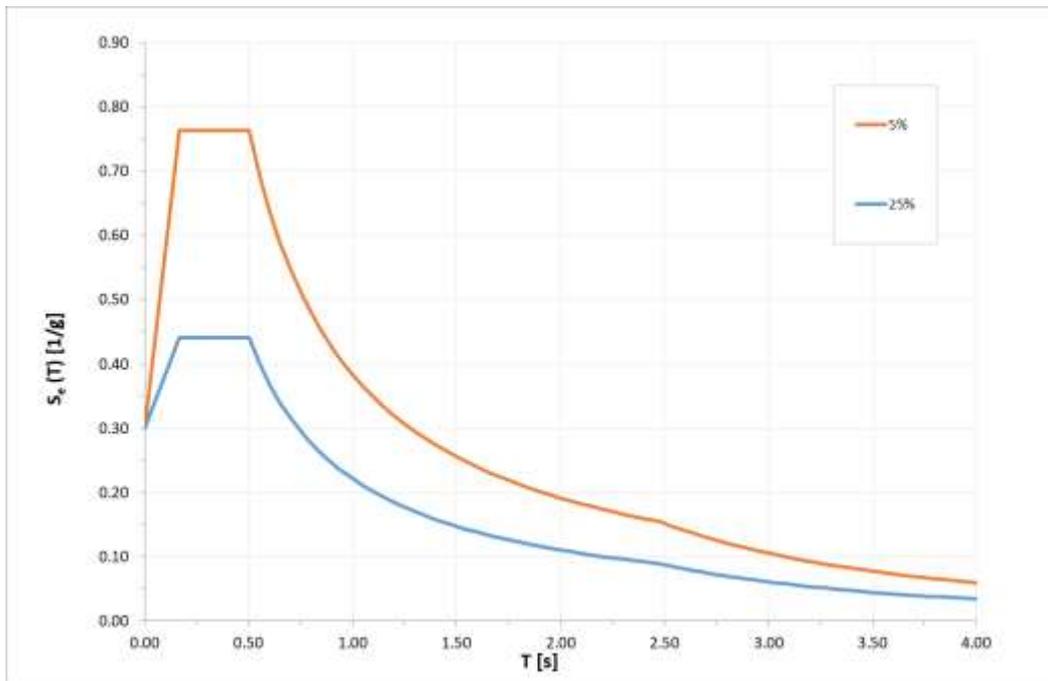


Figura 16 – Spettri elastici in accelerazione allo SLV

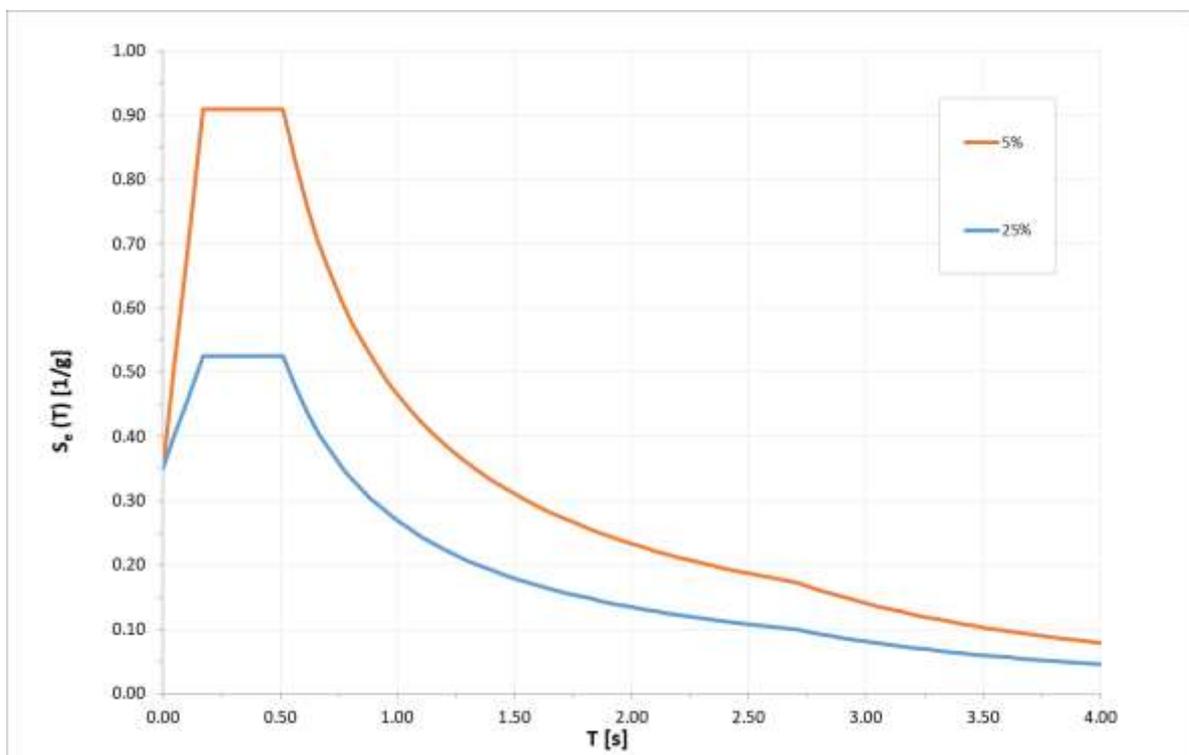


Figura 17 – Spettri elastici in accelerazione allo SLC

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id.doc.	N.prog.	Rev.	Pag.di Pag.
L0703	2B	E	12	VI5700	REL	02	B	28 di 98

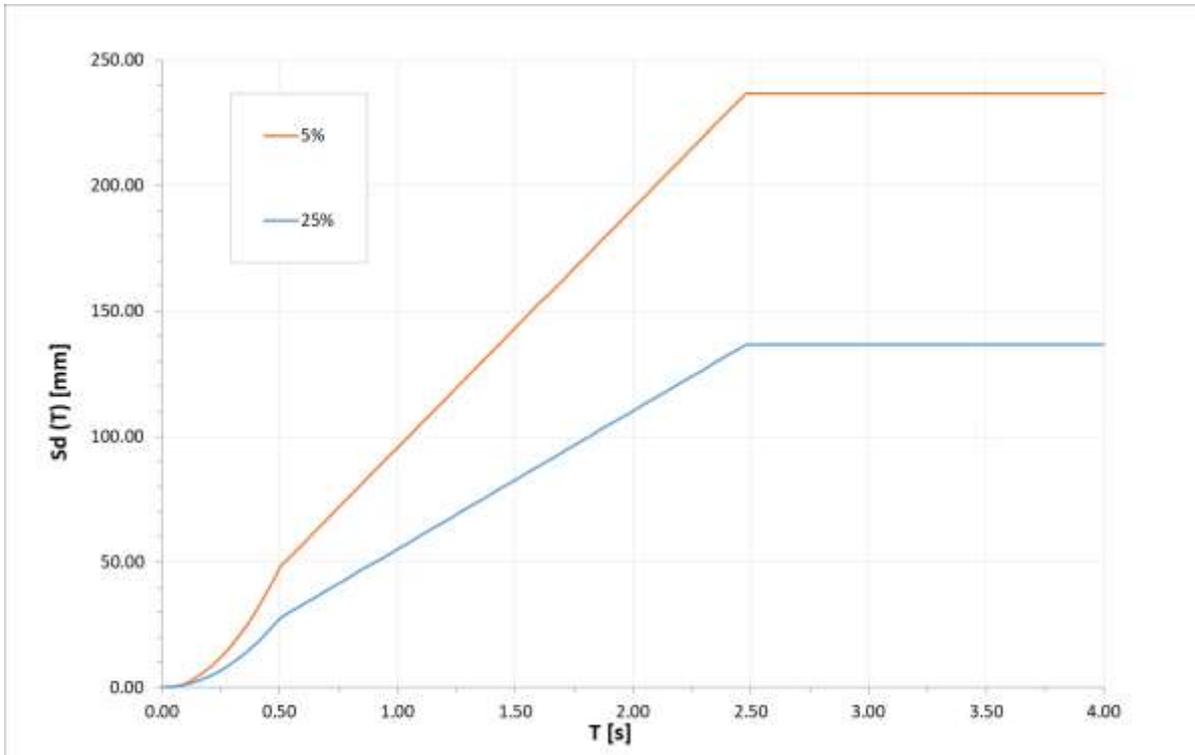


Figura 18 – Spettri in spostamento allo SLV

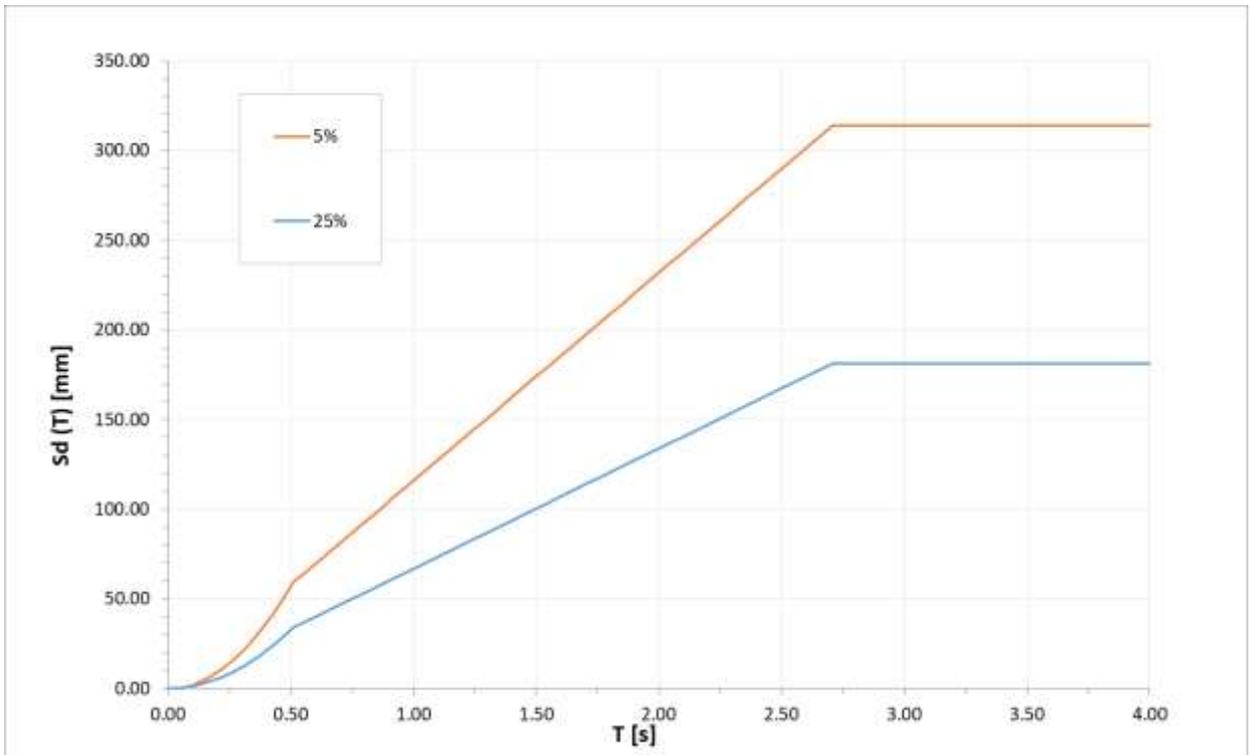


Figura 19 – Spettri in spostamento allo SLC

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 29 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

In accordo a quanto previsto al punto 7.10 del D. M. 14/01/2008 si utilizzano gli spettri allo SLV per le verifiche di resistenza delle sottostrutture e dei dispositivi di isolamento, mentre si utilizza lo spettro allo SLC per la verifica dello spostamento ultimo dei dispositivi di isolamento.

Per il calcolo dell'azione sismica sulle spalle si considera l'accelerazione al suolo a_g .

Si precisa che in fase di analisi dinamica lineare si è adoperato uno spettro modificato che per periodi bassi (inferiori a circa 0.85 s) è calcolato con uno smorzamento del 5%, mentre per periodi alti (superiori a 0.85 s) è calcolato con uno smorzamento del 25%. In questo modo, come si vedrà in seguito, avendo l'impalcato periodi di vibrazione principali in direzione longitudinale e trasversale rispettivamente pari a circa 2.45 s e 1.1 s, il programma di calcolo riesce a valutare, con un'unica analisi, le forze di inerzia dovute alla massa dell'impalcato facendo riferimento ad accelerazioni spettrali con smorzamento del 25% e le forze di inerzia dovute alle masse delle pile (che hanno periodi di vibrazione inferiori a 0.1 s) con riferimento ad accelerazioni spettrali con smorzamento pari al 5%.

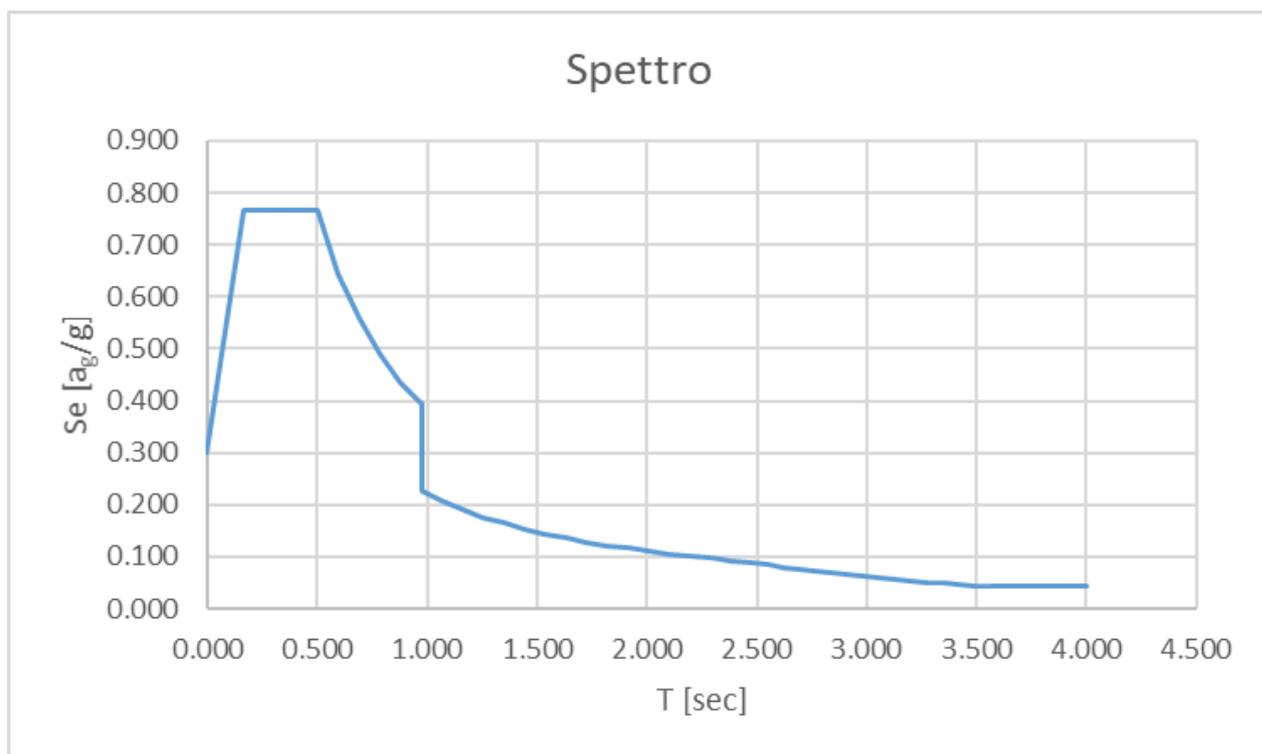


Figura 20 – Spettri elastici in accelerazione “modificati”allo SLV per analisi dinamica lineare

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 30 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

5.11 RESISTENZE PASSIVE DEI VINCOLI (Q7)

Secondo le indicazioni del D.M.14/01/2008 nel calcolo delle spalle, delle fondazioni, degli apparecchi di appoggio e, se del caso, dell'impalcato, si devono considerare le forze che derivano dalle resistenze parassite dei vincoli.

Le resistenze parassite dei vincoli sono valutate assumendo un coefficiente di attrito proporzionale all'intensità del carico verticale secondo le indicazioni fornite dalla norma CNR 10018/99. Il coefficiente di attrito è assunto pari ad $\mu = 0.03$.

Per appoggi mobili le forze dovute all'attrito agiscono in direzione longitudinale, con intensità proporzionale alle singole reazioni verticali degli appoggi stessi. Sugli appoggi fissi agisce, con verso opposto, la risultante delle singole forze agenti sugli appoggi mobili. Nel caso in esame, dato lo schema di vincolo adottato, tali forze si sviluppano sugli appoggi di tutte le sottostrutture e la reazione totale è esplicitata dagli isolatori presenti sulla spalla fissa.

Nella tabella seguente sono riportati i valori calcolati per ogni sottostruttura. In particolare tenendo conto dello schema statico dei vincoli e della presenza di un'unica tipologia di campata di luce $L=25m$ per tutto il viadotto, i carichi verticali si ripartiscono uniformemente sugli appoggi in sinistra e destra della singola campata e sono uguali per tutte le sottostutture:

	PILE					
	APPOGGIO 1		APPOGGIO 2		APPOGGIO 3	
	LATO SX	LATO DX	LATO SX	LATO DX	LATO SX	LATO DX
Vg	1045.6	1045.6	631.4	631.4	1045.6	1045.6
Fa	31.4	31.4	18.9	18.9	31.4	31.4

	SPALLE					
	SPALLA S1			SPALLA S1		
	APP. 1	APP. 2	APP. 3	APP. 1	APP. 2	APP. 3
Vg	1045.6	631.4	1045.6	1045.6	631.4	1045.6
Fa	31.4	18.9	31.4	31.4	18.9	31.4

5.12 URTO DI VEICOLO IN SVIO (Q8)

I sicurvia e gli elementi strutturali ai quali sono collegati devono essere dimensionati in funzione della classe di contenimento richiesta per l'impiego specifico (vedi D.M. 21-06-04 n.2367). Se non diversamente indicato, la forza deve essere considerata distribuita su 0.50 m ed applicata ad una quota h , misurata dal piano viario, pari alla minore delle dimensioni h_1 , h_2 , dove $h_1 = (\text{altezza della barriera} - 0.10m)$, $h_2 = 1.00m$.

Ai sensi del DM 14/01/2008 nel progetto dell'impalcato deve essere considerata una condizione di carico eccezionale nella quale alla forza orizzontale d'urto su sicurvia si associa un carico verticale isolato costituito dallo schema di carico II, posizionato in adiacenza al sicurvia stesso e disposto nella posizione più gravosa.

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 31 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

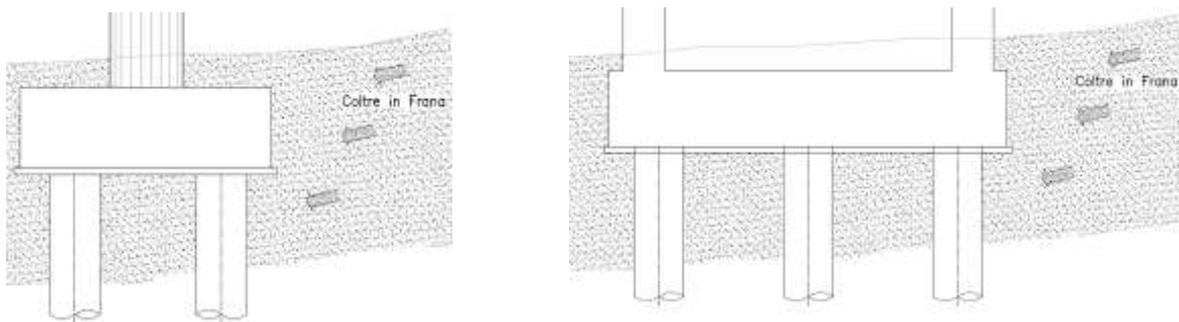
Tale condizione non è però dimensionante per la statica globale dell'impalcato e delle sottostrutture ed è stata considerata solo per la verifica locale del cordolo della soletta in calcestruzzo.

5.13 SPINTE DELL COLTRE IN FRANA (CF)

Nella carta geomorfologica in corrispondenza della spalla 1 è segnalato un piccolo movimento franoso ed in corrispondenza delle pile 2 e 3 è segnalata una frana PAI R1-P1 (codice F-16-0945). Si tratta di piccoli corpi di frana quiescente che interessano le coltri superficiali coesive.

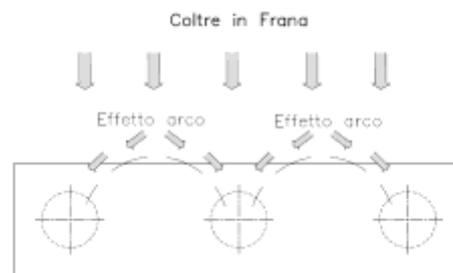
L'inclinometro X3.9 è stato collocato più a monte del tracciato, per problematiche di accesso ed evidenzia un piccolo movimento (5 mm) che interessa uno spessore di 5 m circa che coinvolge una scarpata delimitata dai fossi di scolo della zona.

Nel caso in esame lo spessore della coltre coinvolta da movimento, interessa eventualmente il plinto di fondazione ma non i pali di fondazione. Si è portato in conto, ai fini del dimensionamento delle strutture di fondazione del Viadotto, un'azione che potesse simulare gli effetti dell' eventuale interazione della coltre superficiale con le strutture di fondazione:



Rappresentazione schematica di Fondazione di Pile e Spalla interessate da movimento Franoso

Per la valutazione degli effetti spingenti della frana sull'opera di fondazione si è in particolare ipotizzato di schematizzare la struttura di fondazione come un diaframma continuo che si interpone al movimento del terreno superficiale in frana, in virtù del potenziale effetto arco orizzontale che si sviluppa tra due pali adiacenti impedendo il movimento anche del terreno tra essi interposto.



Effetto arco orizzontale tra pali adiacenti

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 32 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

In queste ipotesi, con riferimento ad un diaframma di lunghezza unitaria, è possibile considerare cautelativamente una spinta complessiva sull'opera pari a:

$$Sfrana = 0.5 \gamma H^2 K_0$$

Dove:

$$\gamma = 19.0 \text{ KN/m}^3$$

$$H = 5 \text{ m (spessore della massa instabile)}$$

$$\varphi' = 18^\circ \text{ (angolo d'attrito residuo coltre in frana)}$$

$$c' = 0 \text{ (valore cautelativo per tener conto del rimaneggiamento del terreno a causa frana)}$$

In queste ipotesi, con riferimento ad un diaframma di lunghezza unitaria, si ha:

$$\text{peso terreno frana} = 19.0 \text{ kN/mc}$$

$$\text{Spessore coltre frana} = 5.0 \text{ m}$$

$$\text{coeff. di spinta} = \text{Riposo} \quad 0.691$$

$$\text{Spinta} = 164.11 \text{ kN/m}$$

Nei riguardi della combinazione con gli altri carichi in progetto, si è ipotizzato di considerare la possibile contemporaneità dell'azione della frana oltre che con eventi sismici anche nei riguardi di una condizione di collasso di SLU di tipo statico, adottando per tale azione, dei coefficienti di combinazione:

$$\gamma_{SLU} \quad 1.35$$

$$\gamma_{SLV} \quad 1.00$$

$$\gamma_{SLE} \quad 0.00$$

In considerazione tuttavia della condizione topografica della zona attraversata dall'opera, si è ritenuto verosimile considerare l'effetto della frana unicamente in direzione trasversale al Viadotto, essendo quest'ultima pressochè parallela a quella di massima pendenza del versante e quindi di possibile attivazione del fenomeno.

Pertanto si applica una azione testa pali in direzione trasversale pari a:

$$F_{Long} = 164.11 \text{ kN/m} \times 7.5 \text{ m} = 1230.8 \text{ kN}$$

6. COMBINAZIONI DI CARICO

Le combinazioni di carico considerate sono stabilite in conformità a quanto prescritto al Cap. 2 del D.M.14/01/2008.

6.1 GRUPPI DI CARICO

Nella tabella seguente, in accordo a quanto specificato in tabella 5.1.3.12 del D.M.14/01/2008., sono esplicitati i gruppi di carico considerati per i carichi accidentali da traffico.

Tabella 10 – Valori caratteristici delle azioni da traffico

<i>Carichi sulla carreggiata</i>						<i>Carichi su marciapiedi e piste ciclabili</i>
Carichi verticali				Carichi orizzontali		Carichi verticali
Gruppo di azioni	Modello principale (Schemi di carico 1, 2, 3, 4, 6)	Veicoli speciali	Folla (Schema di carico 5)	Frenatura q_3	Forza centrifuga q_4	Carico uniformemente distribuito
1	Valore caratteristico					Schema di carico 5 con valore di combinazione $2,5 \text{ kN/m}^2$
2 a	Valore frequente			Valore caratteristico		
2 b	Valore frequente				Valore caratteristico	
3 (*)						Schema di carico 5 con valore caratteristico $5,0 \text{ kN/m}^2$
4 (**)			Schema di carico 5 con valore caratteristico $5,0 \text{ kN/m}^2$			Schema di carico 5 con valore caratteristico $5,0 \text{ kN/m}^2$
5 (***)	Da definirsi per il singolo progetto	Valore caratteristico o nominale				

(*) Ponti di 3ª categoria
 (**) Da considerare solo se richiesto dal particolare progetto (ad es. ponti in zona urbana)
 (***) Da considerare solo se si considerano veicoli speciali

Coerentemente nel seguito si fa riferimento ai gruppi di azioni da traffico 1, 2a e 2b.

6.2 COEFFICIENTI PARZIALI E DI COMBINAZIONE

Si utilizzano i coefficienti parziali di sicurezza e i coefficienti di combinazione di seguito riportati.

Tabella 11 – Coefficienti parziali di sicurezza agli SLU

		Coefficiente	EQU ⁽¹⁾	A1 STR	A2 GEO
Carichi permanenti	favorevoli	γ_{G1}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,10	1,35	1,00
Carichi permanenti non strutturali ⁽²⁾	favorevoli	γ_{G2}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Carichi variabili da traffico	favorevoli	γ_Q	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,35	1,35	1,15
Carichi variabili	favorevoli	γ_{Qe}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Distorsioni e presollecitazioni di progetto	favorevoli	γ_{e1}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,00 ⁽³⁾	1,00 ⁽⁴⁾	1,00
Ritiro e viscosità, Variazioni termiche, Cedimenti vincolari	favorevoli	$\gamma_{e2}, \gamma_{e3}, \gamma_{e4}$	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,20	1,20	1,00

⁽¹⁾ Equilibrio che non coinvolga i parametri di deformabilità e resistenza del terreno: altrimenti si applicano i valori di GEO.
⁽²⁾ Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.
⁽³⁾ 1,30 per instabilità in strutture con precompressione esterna
⁽⁴⁾ 1,20 per effetti locali

Tabella 12 – Coefficienti di combinazione

Azioni	Gruppo di azioni (Tabella 5.1.IV)	Coefficiente ψ_0 di combinazione	Coefficiente ψ_1 (valori frequenti)	Coefficiente ψ_2 (valori quasi permanenti)
Azioni da traffico (Tabella 5.1.IV)	Schema 1 (Carichi tandem)	0,75	0,75	0,0
	Schemi 1, 5 e 6 (Carichi distribuiti)	0,40	0,40	0,0
	Schemi 3 e 4 (carichi concentrati)	0,40	0,40	0,0
	Schema 2	0,0	0,75	0,0
	2	0,0	0,0	0,0
	3	0,0	0,0	0,0
Vento q_s	4 (folla)	----	0,75	0,0
	5	0,0	0,0	0,0
	Vento a ponte scarico SLU e SLE	0,6	0,2	0,0
Esecuzione		0,8	----	0,0
	Vento a ponte carico	0,6		
Neve q_s	SLU e SLE	0,0	0,0	0,0
	esecuzione	0,8	0,6	0,5
Temperatura	T_k	0,6	0,6	0,5

6.3 COMBINAZIONI AGLI SLU

Di seguito si esplicitano i coefficienti utilizzati per le singole combinazioni di carico rilevanti per le verifiche strutturali dell'impalcato agli SLU.

L'espressione per le combinazioni di verifica strutturali (A1 - STR) è:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Mentre quella per le combinazioni sotto SISMA o ECCEZIONALI è:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Tabella 13 - Coefficienti nelle combinazioni di carico agli SLU

Combinazione		G1	G2	E1	E2	E3	Gr.1	Gr.2a	Gr.2b	Q5	Q6	Q7	Q9
A1 STR	Gr.1	1.35	1.35	0	1.2	0.72	1.35	0	0	0.9	0	1.5	0
	Gr.2a	1.35	1.35	0	1.2	0.72	0	1.35	0	0.9	0	1.5	0
	Gr.2b	1.35	1.35	0	1.2	0.72	0	0	1.35	0.9	0	1.5	0
	Q5	1.35	1.35	0	1.2	0.72	1.35ψ ₀ ^(*)	0	0	1.5	0	1.5	0
SISMA	SLV Z	1	1	0	1	0.5	0		0	0	1	0	0
ECCEZIONALE	-	1	1	0	1	0.5	0		0	0	0	0	1

(*) per schema di carico 1, ψ₀ = 0.75 per i carichi tandem e ψ₀ = 0.40 per i carichi distribuiti

6.4 COMBINAZIONI AGLI SLE

Di seguito si esplicitano i coefficienti utilizzati per le singole combinazioni di carico rilevanti per le verifiche dell'impalcato agli SLE.

L'espressione per le combinazioni di verifica RARE è:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

L'espressione per le combinazioni di verifica FREQUENTI è:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

L'espressione per le combinazioni di verifica QUASI PERMANENTI è:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Tabella 14 - Combinazioni agli SLE

Combinazione		G1	G2	E1	E2	E3	Gr.1	Gr.2a	Gr.2b	Q5	Q7
RARA	Gr.1	1	1	0	1	0.6	1	0	0	0.6	1
	Gr.2a	1	1	0	1	0.6	0	1	0	0.6	1
	Gr.2b	1	1	0	1	0.6	0	0	1	0.6	1
	Q5	1	1	0	1	0.6	ψ ₀	0	0	1	1
FREQUENTE	Gr.1	1	1	0	1	0.5	ψ ₁	1	0	0	0
	Q5	1	1	0	1	0.5	0	0	0	0.2	0
QUASI PERMANENTE	-	1	1	0	1	0.5	0	0	0	0	0

(*) per schema di carico 1, ψ₀ = ψ₁ = 0.75 per i carichi tandem e ψ₀ = ψ₁ = 0.40 per i carichi distribuiti

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 36 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	--------------------------

7. MODELLI DI CALCOLO

L'impalcato è costituito da 4 campate appoggiate-appoggiate.

Le spalle sono del tipo "a muri andatori" fondate su pali. Longitudinalmente l'impalcato è libero di scorrere in corrispondenza degli appoggi sulla spalla mobile e delle pile, ed è vincolato solo ad una spalla (spalla fissa), con vincolo costituito dall'isolatore sismico longitudinale di tipo elastoplastico.

Per la valutazione delle sollecitazioni generate dalle azioni sull'impalcato, il modello adottato è costituito dall'impalcato vincolato tramite isolatori a vincoli elastici rappresentativi delle spalle. Gli isolatori sono quindi modellati tramite molle con rigidità elastica equivalente oppure tramite vincoli di tipo non lineare elastoplastico.

Il modello consente la valutazione delle sollecitazioni globali generate dai carichi verticali sull'impalcato, dalle azioni orizzontali tipo vento e frenatura e specificamente dalle azioni sismiche derivanti dalle masse dell'impalcato.

Per i muri verticali delle spalle sono stati adottati modelli a trave con vincolo a mensola per il muro frontale e i muri andatori. Per le platee di fondazione, si è utilizzato un modello tirante puntone per l'analisi e la verifica dello zoccolo anteriore al muro frontale.

Per le pile le sollecitazioni per le verifiche strutturali e geotecniche sono state ricavate direttamente dal modello di calcolo in corrispondenza della sezione di base della pila e dell'intradosso del plinto di fondazione.

7.1 ORIGINE E CARATTERISTICHE DEI CODICI DI CALCOLO

Nell'ambito del presente paragrafo si riporta una descrizione delle caratteristiche dei software utilizzati per l'effettuazione delle analisi e verifiche strutturali esposte ai precedenti paragrafi.

Nello specifico, l'analisi del comportamento globale delle strutture d'impalcato e di fondazione è stato effettuato con l'ausilio del software **MIDAS/CIVIL 2020**, distribuito in Italia dalla **CSPFea** (Padova), di cui si possiede regolare licenza, identificata nello specifico da Key Serial Number n° 34219EF86526F342 intestata a PROGIN SPA – CENTRO DIREZIONALE DI NAPOLI ISOLA F4 - 80143 NAPOLI.

Per l'esecuzione di verifiche di sezioni in cemento armato si è invece utilizzato il software **PresFle+**, prodotto e distribuito dalla **Concrete srl** (Padova), di cui si possiede regolare licenza, identificata nello specifico da chiave USB n° **4552054**, intestata a PROGIN SPA - CENTRO DIREZIONALE DI NAPOLI ISOLA F4 - 80143 NAPOLI.

Infine si è ricorso a fogli di calcolo elettronici auto-prodotti, per l'automatizzazione dei modelli di calcolo a mensola per i muri della spalla e per l'esecuzione delle verifiche con modelli tirante-puntone e per le verifiche a taglio degli elementi in calcestruzzo.

Affidabilità dei codici di calcolo

Un attento esame preliminare della documentazione a corredo dei software impiegati ha consentito di valutarne l'affidabilità. La documentazione fornita dal produttore dei software contiene un'esauriente descrizione delle basi teoriche, degli algoritmi impiegati e l'individuazione dei campi d'impiego. Le stesse società produttrici hanno verificato l'affidabilità e la robustezza dei

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 37 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

codice di calcolo attraverso un numero significativo di casi prova in cui i risultati sono contenuti in apposita documentazione fornita a corredo dell'acquisto del prodotto, che per brevità espositiva si omette di allegare al presente documento.

Giudizio motivato di accettabilità dei risultati

I risultati delle elaborazioni esposte nel documento sono state inoltre sottoposte a controlli dal sottoscritto utente del software.

Tale valutazione ha compreso il confronto con i risultati di semplici calcoli, eseguiti con metodi tradizionali, che per brevità espositiva si omette dall'allegare al presente documento.

Inoltre sulla base di considerazioni riguardanti gli stati tensionali e deformativi determinati, si è valutata la validità delle scelte operate in sede di schematizzazione e di modellazione della struttura e delle azioni.

In base a quanto sopra, Il Progettista dichiara pertanto che l'elaborazione è corretta ed idonea al caso specifico, validando conseguentemente i risultati dei calcoli esposti nella presente relazione.

7.2 MODELLO GLOBALE

Per le analisi dinamiche (lineari e non) dell'opera si adotta un modello di calcolo unifilare, semplificato dunque rispetto a quello utilizzato per l'analisi statica e per la verifica dell'impalcato. Al singolo *beam* costituente l'impalcato viene quindi assegnata la rigidezza equivalente all'intera sovrastruttura.

I vincoli orizzontali sono costituiti unicamente dagli isolatori sismici (lineari o non lineari a seconda dell'analisi svolta).

Gli isolatori sono accoppiati agli apparecchi di appoggio sia in direzione longitudinale che trasversale. Gli isolatori previsti sono di tipo elastoplastico, con le caratteristiche specificate nel seguito e, pertanto, sono caratterizzati, da rigidezze molto elevate per azioni orizzontali inferiori alla soglia plastica, e deformabilità elevata con comportamento non lineare in presenza dei carichi ciclici corrispondenti alle azioni sismiche.

La connessione tra gli elementi trave corrispondenti alle spalle avviene mediante un sistema di vincoli idoneo a simulare gli appoggi verticali, gli isolatori sismici longitudinali e trasversali.

Nella figura seguente è riportata una vista completa del modello di calcolo. Gli elementi di trave, e i traversi in asse appoggio sono allineati con l'estradosso delle travi in acciaio. Avendo adottato un modello unifilare ogni vincolo è rappresentativo delle caratteristiche di tutti gli appoggi presenti su ogni sottostruttura, quindi il singolo link (di tipo elastico o elastoplastico) simula il comportamento dei tre isolatori trasversali e/o longitudinali. Tali vincoli sono comunque rigidi in direzione verticale.

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id.doc.	N.prog.	Rev.	Pag.di Pag.
L0703	213	E	12	VI5700	REL	02	B	38 di 98

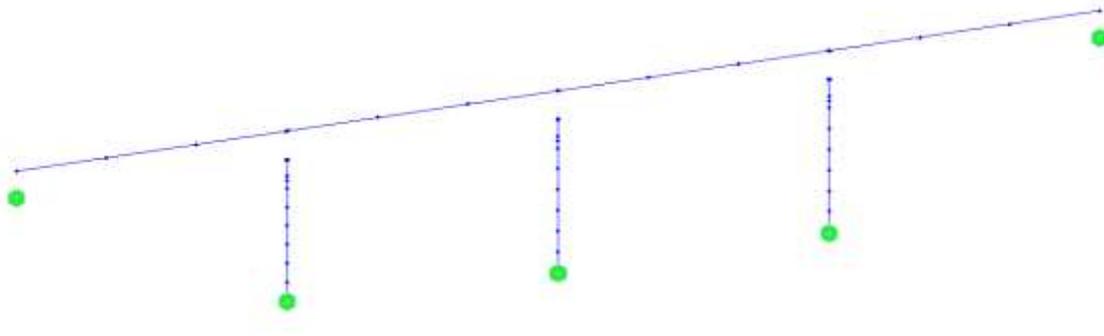


Figura 21 - Modello FEM vista wireframe

Il modello descritto è stato analizzato in presenza dei carichi permanenti per la valutazione delle masse e delle azioni sismiche già definite nel paragrafo 5.10.

Il calcolo è stato sviluppato utilizzando il codice di calcolo Midas Civil 2020, da cui sono stati estratti esclusivamente i risultati relativi alle azioni sismiche e di seguito combinati con i carichi permanenti ed accidentali da considerare in combinazione sismica.

Per la modellazione delle azioni statiche è stata sviluppata una modellazione elastica lineare degli isolatori trasversali e longitudinali corrispondenti alla rigidezza iniziale elastica di tali elementi, tenendo conto dei valori delle azioni orizzontali, dovute sostanzialmente al vento, che risultano, nel caso in esame, largamente inferiori alla soglia plastica degli isolatori.

Per la modellazione delle azioni sismiche è stata sviluppata:

- un'analisi dinamica modale basata su un modello lineare equivalente degli isolatori elastoplastici;
- un'analisi dinamica non lineare basata su accelerogrammi generati artificialmente.

Si rimanda al paragrafo relativo ai metodi di analisi per il dettaglio delle modalità adottate ed i risultati ottenuti.

7.3 MODELLI A MENSOLA PER LA VERIFICA DELLE SPALLE

Le sollecitazioni globali che le spalle ricevono dall'impalcato, sono ottenute dai modelli di calcolo globali implementati in Midas Civil 2020. A tali sollecitazioni sono aggiunti i pesi propri degli elementi strutturali, del terreno di riempimento della spalla, le spinte del terreno di rilevato e, in condizioni sismiche, le masse.

Le spinte del terreno di rilevato, invece, sono state valutate come segue, con riferimento alle seguenti caratteristiche fisico meccaniche del terreno di rilevato.

- $\phi = 38^\circ$ angolo d'attrito;
- $c = 0$ coesione interna;
- $\gamma = 20 \text{ kN/mc}$ peso specifico.

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 39 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

7.3.1 Condizioni statiche

La spinta del terreno del rilevato in condizioni statiche, viene valutata in termini di spinta a riposo, adottando un coefficiente di spinta pari a:

$$K_0 = (1 - \sin\varphi)$$

Ne consegue che la spinta statica agente su un metro di parete con altezza H è pari a:

$$S_{\text{stat}} = \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 \cdot k_0$$

La spinta così calcolata è applicata ad una altezza pari a $H/3$.

In condizioni statiche si considera un sovraccarico accidentale pari a $Q = 20.0 \text{ KN/m}^2$.

La presenza del sovraccarico Q genera una spinta pari a:

$$S_q = Q \cdot H \cdot K_0$$

Tale spinta è applicata ad una altezza pari a $H/2$.

7.3.2 Condizioni sismiche

Conformemente alle indicazioni fornite dalle seguenti norme:

- D.M 14/01/2008;
- UNI EN 1997-2005-Progettazione Geotecnica

le azioni indotte dal terreno in condizioni sismiche sulle strutture della spalla sono valutate con le seguenti modalità.

Le azioni sismiche orizzontali e verticali che si interessano le strutture delle spalle ed il terreno di riempimento tra i muri andatori sono state valutate in accordo alle specifiche fornite dal DM 14/01/08 per la verifica sismica delle opere di sostegno (prg 7.11.6.2.1 *Metodi di analisi*).

Nello specifico, le azioni le forze di inerzia orizzontali (F_h) e verticali (F_v) da considerare nell'ambito delle verifiche con metodi pseudo statici, si ottengono applicando ai pesi propri e permanenti i seguenti coefficienti sismici

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 40 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

Nelle verifiche allo stato limite ultimo, i valori dei coefficienti sismici orizzontale k_h e verticale k_v possono essere valutati mediante le espressioni

$$k_h = \beta_m \cdot \frac{a_{max}}{g} \quad (7.11.6)$$

$$k_v = \pm 0,5 \cdot k_h \quad (7.11.7)$$

dove

a_{max} = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

g = accelerazione di gravità.

In assenza di analisi specifiche della risposta sismica locale, l'accelerazione massima può essere valutata con la relazione

$$a_{max} = S \cdot a_g = S_s \cdot S_T \cdot a_g \quad (7.11.8)$$

dove

S = coefficiente che comprende l'effetto dell'amplificazione stratigrafica (S_s) e dell'amplificazione topografica (S_T), di cui al § 3.2.3.2;

a_g = accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

Nella precedente espressione, il coefficiente β_m assume i valori riportati nella Tab. 7.11-II.

Per muri che non siano in grado di subire spostamenti relativi rispetto al terreno, il coefficiente β_m assume valore unitario.

Nel caso di muri di sostegno liberi di traslare o di ruotare intorno al piede, si può assumere che l'incremento di spinta dovuta al sisma agisca nello stesso punto di quella statica. Negli altri casi, in assenza di specifici studi si deve assumere che tale incremento sia applicato a metà altezza del muro.

Tabella 7.11-II - Coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.

	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	β_m	β_m
$0,2 < a_g(g) \leq 0,4$	0,31	0,31
$0,1 < a_g(g) \leq 0,2$	0,29	0,24
$a_g(g) \leq 0,1$	0,20	0,18

Figura 22 – Coefficienti sismici (estratto D.M. 14/01/2008 p.to 7.11.6.2.1)

Con riferimento al valore da assegnare al coefficiente β_m , si è fatto riferimento alle indicazioni di cui alla Tabella 7.1.II riportata nella stessa sezione della norma, tenendo tuttavia conto della specifica che prescrive, nel caso di muri che non siano in grado di subire spostamenti (quale è il caso delle spalle del viadotto in questione che in virtù della elevata rigidità sia del sistema di fondazione che della parte in elevazione, è interessata da spostamenti trascurabili durante l'evento sismico) un valore del coefficiente β_m pari ad 1.0. Assumendo tale valore si considera che, cautelativamente, il terreno di riempimento è rigidamente connesso alla spalla e non subisce deformazioni o movimenti relativi rispetto ad essa.

I coefficienti sismici allo SLV sono quindi pari a:

- $K_h = 0.300$;

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 41 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

- $K_v = 0.150$.

La forza di calcolo E_d è da considerare come la risultante delle spinte statiche e dinamiche del terreno.

In assenza di uno studio più dettagliato che prenda in considerazione la rigidità relativa, il tipo di movimento e la massa dell'opera di sostegno, si assume che la forza dovuta alla spinta dinamica del terreno sia applicata a metà altezza del muro ed agisca con un'inclinazione rispetto alla normale al muro uguale a zero.

La spinta totale di progetto E_d esercitata dal terrapieno ed agente sull'opera di sostegno in condizioni sismiche e data da:

$$E_d = \frac{1}{2} \gamma (1 \pm k_v) K H^2 + E_{ws}$$

dove:

- H è l'altezza del muro;
- E_{ws} è la spinta idrostatica;
- γ è il peso specifico del terreno (definito ai punti seguenti);
- K è il coefficiente di spinta del terreno (statico + dinamico).

Il coefficiente di spinta del terreno può essere calcolato mediante la formula di Mononobe e Okabe.

Per stati di spinta attiva:

$$\beta \leq \phi - \theta: K = \frac{\text{sen}^2(\psi + \phi - \theta)}{\cos \theta \text{sen}^2 \psi \text{sen}(\phi - \theta - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi + \delta) \text{sen}(\phi - \beta - \theta)}{\text{sen}(\phi - \theta - \delta) \text{sen}(\psi + \beta)}} \right]^2}$$

$$\beta > \phi - \theta: K = \frac{\text{sen}^2(\psi + \phi - \theta)}{\cos \theta \text{sen}^2 \psi \text{sen}(\psi - \theta - \delta)}$$

Nelle precedenti equazioni vengono usati i seguenti valori:

- $\phi = 38^\circ$ angolo di resistenza a taglio del terreno in condizioni di sforzo efficace;
- $\psi = 90^\circ$ angolo d'inclinazione rispetto all'orizzontale della parete del muro di monte;
- $\beta = 0^\circ$ angolo d'inclinazione rispetto all'orizzontale della superficie del terrapieno;
- $\delta/\phi = 0.66$ rapporto angolo di attrito terra-muro e angolo di resistenza a taglio
- $\tan \theta = \frac{k_h}{1 + k_v}$

In particolare, per il calcolo della spinta statica esercitata sul muro frontale e sui muri laterali dal terreno contenuto nella spalla, si è fatto riferimento, per la fase statica, ad una situazione di spinta a riposo (K_0); per quanto riguarda invece la fase sismica, si sommano agli effetti di una situazione di spinta attiva, gli incrementi di spinta esercitati dal terreno in fase sismica ottenuti convenzionalmente come differenza tra spinta attiva valutata in condizioni sismiche (K'_a , calcolato con l'espressione di Mononobe-Okabe) ed in fase statica.



2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 42 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

Infine, nel caso specifico non essendo presente la falda, la spinta idrostatica è nulla.

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 43 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

8. METODI DI ANALISI E DI VERIFICA

8.1 ANALISI STATICA

L'analisi statica è stata sviluppata per le seguenti condizioni di carico:

- pesi propri e carichi permanenti (G_i);
- carichi da traffico e azione del vento (Q_i);

Le resistenze parassite dei vincoli, sono state valutate a seguito dei risultati derivanti dal modello di calcolo globale, in quanto sono un'aliquota degli scarichi agenti sugli appoggi (vedi paragrafo specifico).

L'analisi è stata sviluppata per le diverse condizioni di carico precedentemente indicate.

8.2 ANALISI SISMICA

La valutazione delle azioni sismiche e dei criteri di dimensionamento delle sottostrutture e dei dispositivi di isolamento è stata sviluppata nel rispetto delle indicazioni e prescrizioni riportate nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008).

Si osserva che per le zone sismiche in esame la nuova normativa prevede valori massimi delle accelerazioni (spettro di risposta elastico) dell'ordine di 0.7 g (SLV) – 0.9 g (SLC). Tali azioni risultano particolarmente gravose nei riguardi delle sottostrutture. Pertanto al fine di contenere in limiti realistici le dimensioni di spalle e fondazioni, risulta indispensabile l'adozione di dispositivi di isolamento idonei a limitare l'azione sismica in valori accettabili.

Per la valutazione delle azioni sismiche e per la definizione delle caratteristiche meccaniche dei dispositivi di isolamento, si è proceduto con i seguenti criteri e considerazioni preliminari:

- obiettivo del sistema di isolamento sismico è il contenimento delle azioni orizzontali trasmesse alle sottostrutture in valori compresi tra il 10% ed il 20% del peso dell'impalcato. In particolare, si è proceduto dimensionando gli isolatori in modo da limitare l'azione trasversale sismica in circa il 20% del peso dell'impalcato, e l'azione sismica longitudinale in circa il 10% del peso dell'impalcato. Tale scelta è considerata ottimale ai fini del dimensionamento delle sottostrutture;
- il dispositivo di isolamento sismico longitudinale o trasversale comporta durante l'evento sismico uno spostamento relativo tra sottostrutture (spalle) ed impalcato il cui valore risulta determinante per l'abbattimento dell'azione sismica. Tale valore non può d'altra parte risultare troppo elevato e quindi incompatibile con il funzionamento degli apparecchi di appoggio e dei giunti. Per il dimensionamento del sistema di isolamento è stato fissato come spostamento relativo massimo un valore di circa ± 100 mm per gli isolatori longitudinali, e di circa ± 50 mm per gli isolatori trasversali;

Per la valutazione delle azioni sismiche e per il dimensionamento delle sottostrutture, si è fatto riferimento sia ad un procedimento elastico lineare equivalente sia ad un'analisi dinamica non lineare basata sull'effettivo legame costitutivo degli isolatori. La procedura adottata è caratterizzata dalle seguenti fasi e modalità:

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 44 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

- Preliminarmente gli isolatori sono stati schematizzati con un modello viscoelastico lineare, conformemente alle indicazioni di normativa e a criteri di progettazione recentemente proposti e adottati¹²³⁴. Per il dimensionamento del dispositivo lineare equivalente e delle azioni sismiche si è proceduto con la metodologia basata sugli spostamenti (*Displacement-Based Approach*) che caratterizza l'input sismico assegnando lo spostamento relativo massimo tra suolo e struttura. Nel caso in esame tale spostamento relativo coincide, ad esempio, per sisma longitudinale, con la deformazione del dispositivo. Successivamente è stato definito il legame costitutivo non lineare caratterizzante l'isolatore sismico elastoplastico reale, e sulla base di modelli semplificati ad un grado di libertà è stata verificata la sostanziale equivalenza fra il comportamento dell'oscillatore semplice in presenza del dispositivo elastoplastico e del dispositivo elasto-viscoso lineare "equivalente" (vedi anche OPCM 3274 d.d. 20/03/2003).
- La seconda fase della procedura consiste nella valutazione degli effetti indotti dalle azioni sismiche sul modello globale della struttura precedentemente descritto nel paragrafo 7.2. Gli isolatori sono schematizzati come elementi elastoplastici non lineari, equivalenti agli effettivi dispositivi elastoplastici, e gli effetti delle azioni sismiche sono valutati con l'analisi dinamica modale e l'utilizzo dello spettro di risposta presentato al paragrafo 5.10. Le sollecitazioni così determinate sono state utilizzate per le verifiche di resistenza delle sottostrutture successivamente sviluppate.
- La terza fase prevede l'analisi dinamica non lineare del modello globale introducendo per gli isolatori elementi link con l'effettivo comportamento elastoplastico, ed applicando come azione gli accelerogrammi artificiali opportunamente generati (vedi D.M. 14/1/08).

In tale sede si specifica che il D.M. 14/01/2008 al p.to 7.10.5.2 prevede delle condizioni per l'adozione della modellazione del sistema di isolamento come lineare equivalente:

- a) la rigidezza equivalente del sistema d'isolamento è almeno pari al 50% della rigidezza secante per cicli con spostamento pari al 20% dello spostamento di riferimento;
- b) lo smorzamento lineare equivalente del sistema di isolamento, come definito in precedenza, è inferiore al 30%;
- c) le caratteristiche forza-spostamento del sistema d'isolamento non variano di più del 10% per effetto di variazioni della velocità di deformazione, in un campo del $\pm 30\%$ intorno al valore di progetto, e dell'azione verticale sui dispositivi, nel campo di variabilità di progetto;
- d) l'incremento della forza nel sistema d'isolamento per spostamenti tra $0,5d_{dc}$ e d_{dc} , essendo d_{dc} lo spostamento del centro di rigidezza dovuto all'azione sismica, è almeno pari al 2,5% del peso totale della sovrastruttura.

Nel caso in esame, tralasciando la condizione c) che fa riferimento a dispositivi di isolamento le cui caratteristiche variano per effetto delle velocità di deformazione (es. dissipatori viscosi) o dei carichi

¹Mervyn J. Kowalsy – A displacement-based approach for seismic design of continuous concrete

² B.Borzi, G.M.Calvi, A.S.Elnashai, E.Faccioli,J.J.Bommer - Inelastic spectra for displacement – based seismic design - Soil Dynamics and Earthquake engineering 21 (2001) 47-61.

³AASHTO 1999 - Guide Specifications for Seismic Isolation Design.

⁴Fib bulletin 25 may 2003 – Displacement-Based seismic design of reinforced concrete buildings.

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id.doc.	N.prog.	Rev.	Pag.di Pag.
L0703	213	E	12	VI5700	REL	02	B	45 di 98

verticali agenti (es. isolatori a scorrimento o elastomerici), l'unica condizione soddisfatta risulta essere la condizione b), mentre le condizioni a) e d) non risultano verificate. La modellazione degli isolatori con sistemi a comportamento elastico lineare equivalente a rigore non è utilizzabile; i risultati dell'analisi dinamica non lineare, però, forniscono valori delle sollecitazioni e degli spostamenti affini a quelli ottenuti con il modello lineare "equivalente" per gli isolatori, e, pertanto, confermano la validità dei risultati ottenuti con tale analisi. Nel seguito vengono dettagliate le modalità di calcolo adottate e i risultati ottenuti.

Per il dimensionamento degli isolatori trasversali e longitudinale si schematizza il comportamento della struttura con un modello ad un grado di libertà caratterizzato da un solo isolatore con legge costitutiva lineare e non lineare.

Nella direzione trasversale, il modello è vincolato in corrispondenza delle pile e spalle da isolatori viscoelastici come definito al paragrafo seguente.

Nella direzione longitudinale, il modello è costituito da una massa corrispondente alla massa dell'intero impalcato vincolata con un dispositivo di isolamento sismico alla spalla fissa considerata rigida.

È necessario precisare che gli isolatori reali sono non lineari e, per questo motivo, la progettazione e la verifica dell'isolatore è sviluppata seguendo una procedura a due passi: nel primo si progettano le caratteristiche dell'isolatore utilizzando come modello un isolatore equivalente viscoelastico lineare, nel secondo vengono definite le caratteristiche dell'isolatore elastoplastico non lineare reale. Successivamente, al fine di verificare la sostanziale equivalenza fra l'isolatore lineare e quello effettivo, viene sviluppata un'analisi dinamica non lineare utilizzando tre gruppi di *accelerogrammi spettrocompatibili*, ossia accelerogrammi il cui spettro affine allo spettro di risposta definito da normativa.

8.2.1.1 *Isolatore viscoelastico lineare "equivalente"*

Le caratteristiche dell'elemento elastico viscoso lineare sono fissate a partire dallo spostamento relativo massimo ammissibile (denotato con 'd') e assumendo un valore prefissato per il coefficiente di smorzamento equivalente (denotato con 'ξ'). Nel caso in esame si è proceduto adottando cautelativamente il valore $\xi = 25\%$.

Dallo spettro di risposta elastica in spostamento viene dedotto, per i valori assegnati di d e ξ il periodo dell'oscillatore ed infine, in funzione della massa viene dedotta la rigidità "equivalente" e la forza massima che si prevede sarà trasmessa dall'isolatore.

Di seguito si riporta il dimensionamento degli isolatori longitudinali e trasversali.

Direzione longitudinale

Per il viadotto in esame, si considera l'intera massa dell'impalcato per l'analisi sismica in direzione longitudinale:

- 1) Si valuta, inizialmente, la massa dell'impalcato:

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id.doc.	N.prog.	Rev.	Pag.di Pag.
L0703	213	E	12	VI5700	REL	02	B	46 di 98

- P = peso proprio e permanenti portati = 21694kN;
 - M = massa dell'impalcato = 2212 t (kN sec²/m);
- 2) Si fissa uno spostamento massimo $\delta_{max} = 135$ mm;
 - 3) In corrispondenza del coefficiente viscoso $\xi=25\%$ e dallo spettro di risposta in termini di spostamenti, si sceglie il periodo che corrisponde a δ_{max} : $T(\delta_{max}) = 2.454$ sec

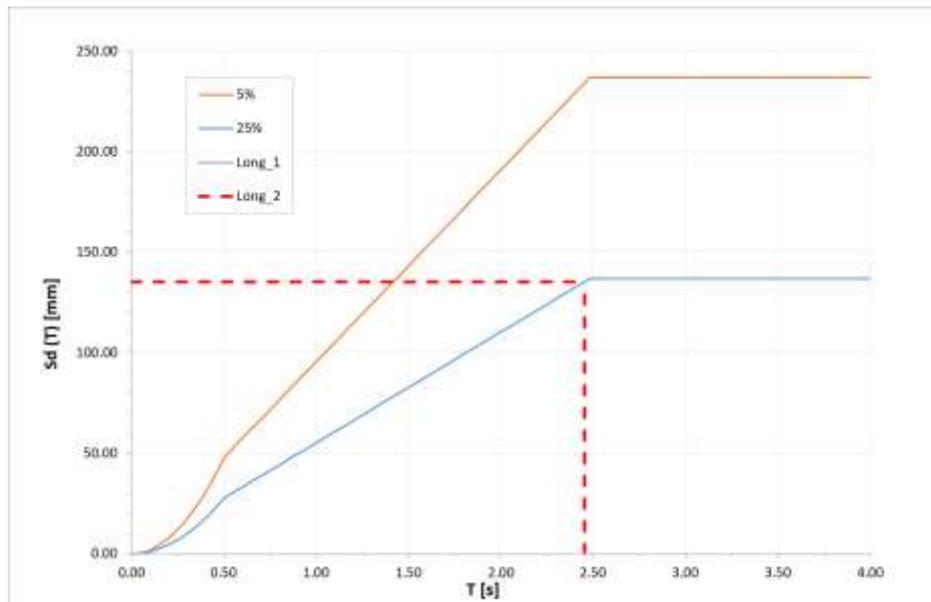


Figura 23 - Relazione fra spostamento di soglia e periodo di progetto (direzione longitudinale)

- 4) Si valuta la rigidezza $K = M \cdot (T/(2\pi))^2$ corrispondente al periodo T: $K_{E,Eq} = 14503$ kN/m
- 5) Si determina nello spettro di risposta in termini di accelerazioni la forza massima denotata con $F_{max} = 1960$ kN ($0.1 \cdot P$);

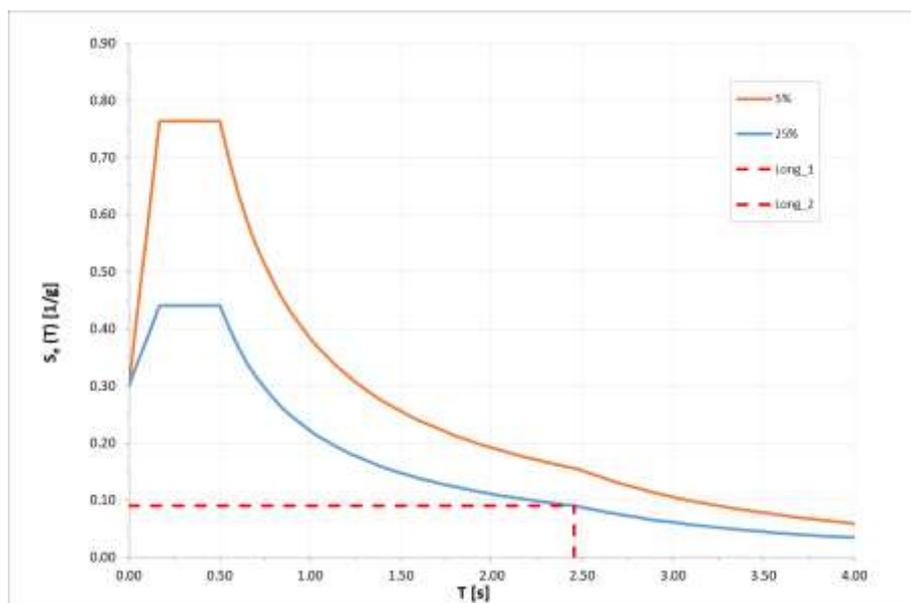


Figura 24 - Relazione fra spostamento di soglia e periodo di progetto (direzione longitudinale)

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id.doc.	N.prog.	Rev.	Pag.di Pag.
L0703	213	E	12	VI5700	REL	02	B	47 di 98

Direzione trasversale

Per il viadotto in esame si considera la massa afferente a ciascuna sottostruttura. A titolo di esempio si riporta il dimensionamento degli isolatori trasversali presenti sulle pile.

- 1) Si valuta, inizialmente, la massa dell'impalcato:
 - P = peso proprio e permanenti portati = 2712 kN;
 - M = massa dell'impalcato = 277 t (kN sec²/m);
- 2) Si fissa uno spostamento massimo $\delta_{max} = 60$ mm;
- 3) In corrispondenza del coefficiente viscoso $\xi=25\%$ e dallo spettro di risposta in termini di spostamenti, si sceglie il periodo che corrisponde a δ_{max} : $T(\delta_{max}) = 1.10$ sec

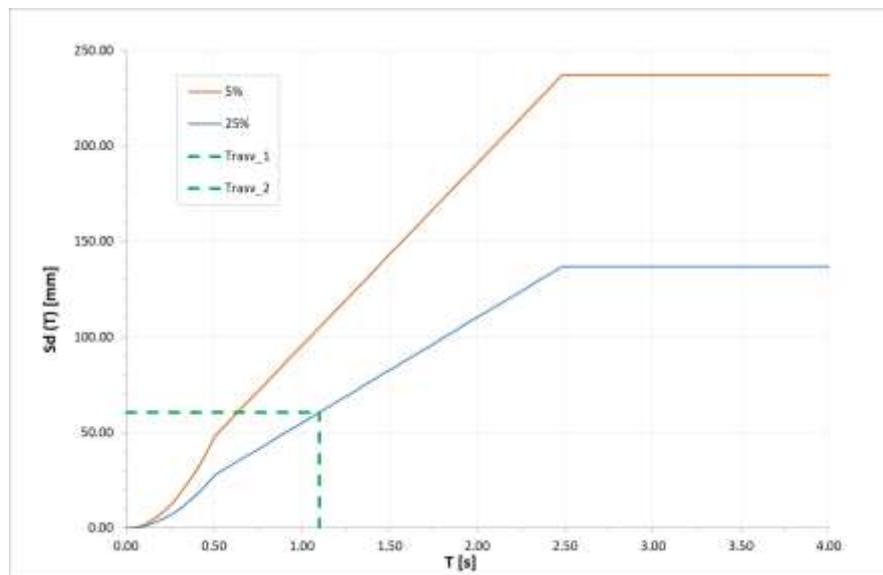


Figura 25 – Relazione fra spostamento di soglia e periodo di progetto (direzione trasversale)

- 4) Si valuta la rigidezza $K = M \cdot (T/(2\pi))^{-2}$ corrispondente al periodo T: $K_{E,Eq} = 9023$ kN/m
- 5) Si determina nello spettro di risposta in termini di accelerazioni la forza massima denotata con $F_{max} = 550$ kN ($0.2 \cdot P$);

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 48 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

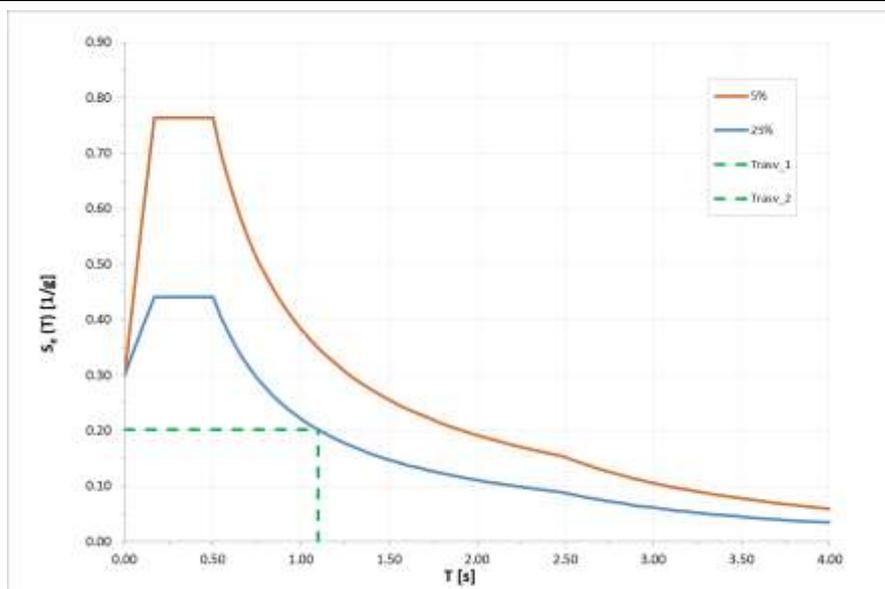


Figura 26 - Relazione fra spostamento di soglia e periodo di progetto (direzione trasversale)

8.2.1.2 Isolatori elastoplastici

Tali elementi sono realizzati con lastre in acciaio opportunamente sagomate e pertanto il loro comportamento (forza – scorrimento) è inizialmente elastico con graduale passaggio alla fase di snervamento e successivo comportamento plastico incrudente.

In presenza di azioni cicliche l'elemento presenta allo scarico un comportamento di tipo elastico e, quindi, conformemente alle indicazioni normative, il legame $F-\delta$ può essere schematizzato con un legame bilineare del tipo indicato in figura.

I dispositivi sono caratterizzati dalla forza di snervamento $F_y=F_1$, dalla forza massima $F_{max}=F_2$ e dalle rigidezze $K_{iniz} - K_{fin}$ relative al tratto elastico ed al tratto plastico delimitati dai parametri di spostamento $\delta^{min}=d_1$ e $\delta^{max}=d_2$. Di seguito si riportano i valori relativi al sisma trasversale.

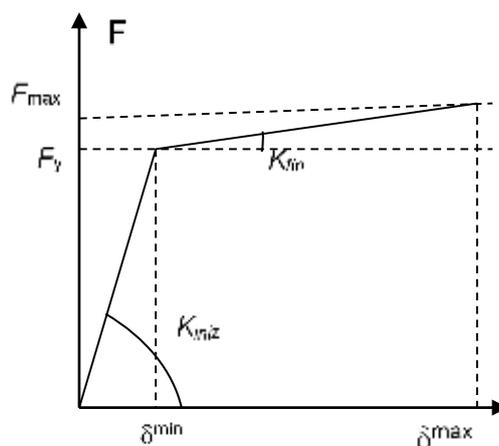


Figura 27 - Andamento qualitativo della legge forza-scorrimento caratteristica degli isolatori elasto-plastici

I parametri F_y , δ^{min} , K_{iniz} e K_{fin} sono stati definiti come segue:

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 49 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

- La soglia di snervamento dell'isolatore è valutata pari a $F_y = F_{max} / 1.15$.
- Lo spostamento corrispondente alla forza di snervamento è assunto pari a circa $\delta^{min} = 0.1 \times \delta^{max}$
- Pertanto la rigidità iniziale dell'isolatore è:

$$K_{iniz} = \frac{F_y}{\delta^{min}}$$

- Infine, la rigidità nella fase di incrudimento è pari a:

$$K_{fin} = \frac{F_{max} - F_y}{\delta^{max} - \delta^{min}}$$

Tale procedimento è stato adottato sia per il dimensionamento degli isolatori trasversali sia per quello longitudinale partendo dai valori di F_{max} e δ^{max} precedentemente ottenuti nel dimensionamento dell'isolatore viscoelastico lineare.

In definitiva il comportamento e l'equivalenza fra i due modelli è riassunto nella figura seguente.

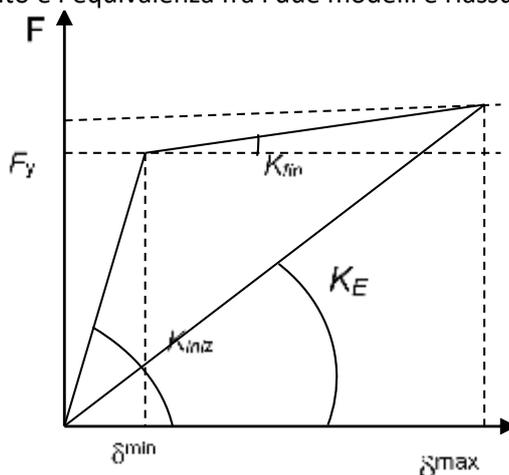


Figura 28 - Schema di equivalenza fra l'isolatore non lineare e l'isolatore lineare equivalente (K_E)

L'equivalenza dei due modelli è stata verificata analizzando il comportamento di oscillatori elastoplastici con analisi dinamica non lineare al passo applicando gli accelerogrammi artificiali specificati nel paragrafo 'Analisi dinamica non lineare'.

Da numerose analisi sviluppate è risultato che i valori di F_{max} e δ^{max} dell'oscillatore risultano sempre inferiori ai valori corrispondenti al modello viscoelastico lineare "equivalente". Tale risultato indica che il coefficiente di smorzamento equivalente ξ del modello viscoelastico lineare dovrebbe essere incrementato oltre il valore del 25% fissato per il dimensionamento.

Nell'analisi dinamica modale si è comunque conservato il valore $\xi = 25\%$ e, pertanto, i risultati ottenuti sono sicuramente cautelativi.

I parametri K_{iniz} degli isolatori sismici trasversali e longitudinali sono stati utilizzati nell'analisi statica del modello globale, per modellare i link elastici trasversali presenti in corrispondenza delle pile e di quello longitudinale presente sulla spalla fissa.

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 50 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	--------------------------

I parametri K_E degli isolatori sismici trasversali e longitudinali sono stati utilizzati nell'analisi dinamica modale del modello globale, per modellare i link elastici trasversali presenti in corrispondenza delle pile e di quello longitudinale presente sulla spalla fissa

I parametri F_y , δ^{\min} , K_{inz} e K_{fin} sono stati utilizzati nell'analisi dinamica non lineare del modello globale, per modellare i link elastoplastici trasversali presenti in corrispondenza delle pile e di quello longitudinale presente sulla spalla fissa.

I valori complessivi delle forze F_{maxL} e F_{maxT} sono deducibili dalle indicazioni riportate nelle tavole "apparecchi di appoggio e giunti".

Tabella 15– Parametri per il modello elasto-equivalente

DIMENSIONAMENTO ISOLATORE ELASTICO EQUIVALENTE										
Direzione	Spalla	G kN	m kNs ² /m	d _{max} mm	T s	K _E kN/m	F _{max} kN	n _{is} -	K _{E,1} kN/m	F _{max,1} kN
Longitudinale	S1	21694	2212	135	2.454	14503	1960	3	4834	660
	P1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	S2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Trasversale	S1	2712	277	60	1.100	9023	550	3	3008	190
	P1	2712	277	60	1.100	9023	550	3	3008	190
	P2	2712	277	60	1.100	9023	550	3	3008	190
	P3	2712	277	60	1.100	9023	550	3	3008	190
	S2	2712	277	60	1.100	9023	550	3	3008	190

I parametri F_y , δ^{\min} , K_{inz} e K_{fin} del modello elastoplastico corrispondenti agli isolatori sismici sono riassunti nella tabella seguente.

Tabella 16– Parametri per il modello elasto-plastico

DIMENSIONAMENTO ISOLATORE ELASTO-PLASTICO													
Direzione	Spalla	F _{max} kN	F _y kN	d _{max} mm	d _y mm	K _{in} kN/m	K _{fin} kN/m	n _{is} -	K _{in} kN/m	K _{fin} kN/m	F ₁ kN	F ₂ kN	ρ -
Longitudinale	S1	1960	1710	135	15	114000	2083	3	38000	694	570	660	0.0183
	P1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	S2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Trasversale	S1	550	480	60	6	80000	1296	3	26667	432	160	190	0.0162
	P1	550	480	60	6	80000	1296	3	26667	432	160	190	0.0162
	P2	550	480	60	6	80000	1296	3	26667	432	160	190	0.0162
	P3	550	480	60	6	80000	1296	3	26667	432	160	190	0.0162
	S2	550	480	60	6	80000	1296	3	26667	432	160	190	0.0162

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 51 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

Si sottolinea che, per ogni dispositivo, è stato verificato che il valore della forza di snervamento è sempre largamente superiore alla forza indotta nell'isolatore dalle azioni statiche determinate nell'analisi statica.

8.2.2 Analisi dinamica lineare (analisi modale)

L'analisi dinamica modale è stata sviluppata utilizzando il modello globale illustrato nei paragrafi precedenti ed utilizzando gli spettri di risposta presentati nel paragrafo relativo all'analisi dei carichi.

I parametri K_E degli isolatori sismici trasversali e longitudinali valutati precedentemente sono stati utilizzati per modellare i link elastici presenti in corrispondenza delle sottostrutture.

8.2.2.1 Risultati dell'analisi modale

Sono stati analizzati un totale di 80 modi di vibrare. Si riportano i modi di vibrare principali della con i relativi periodi e masse partecipanti.

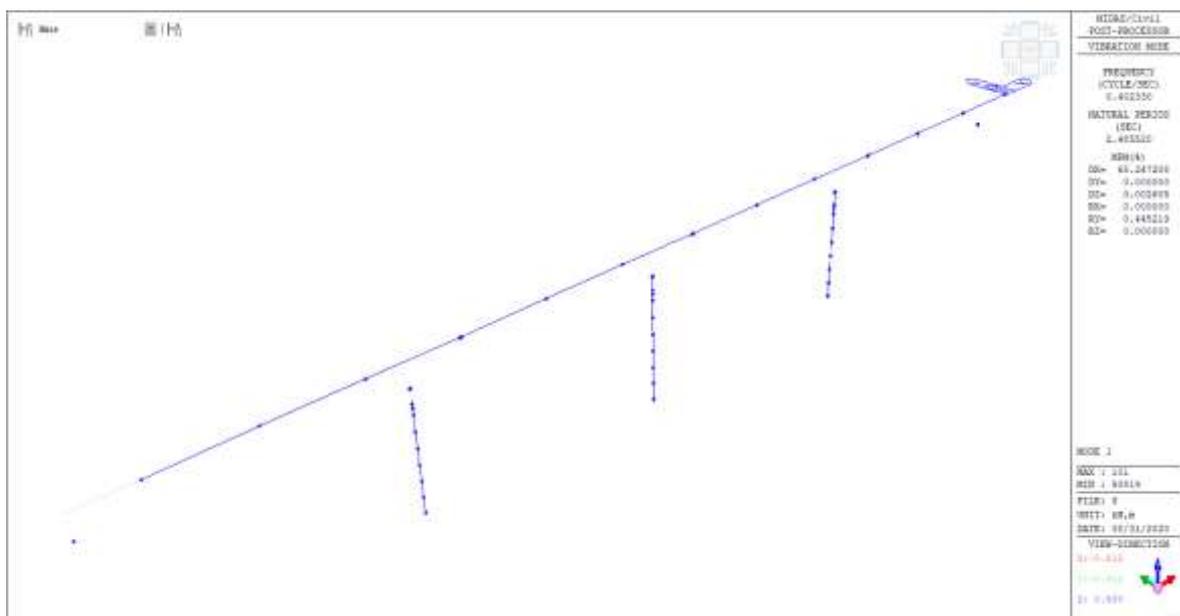


Figura 29: Modo 1

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id.doc.	N.prog.	Rev.	Pag.di Pag.
L0703	213	E	12	V15700	REL	02	B	52 di 98

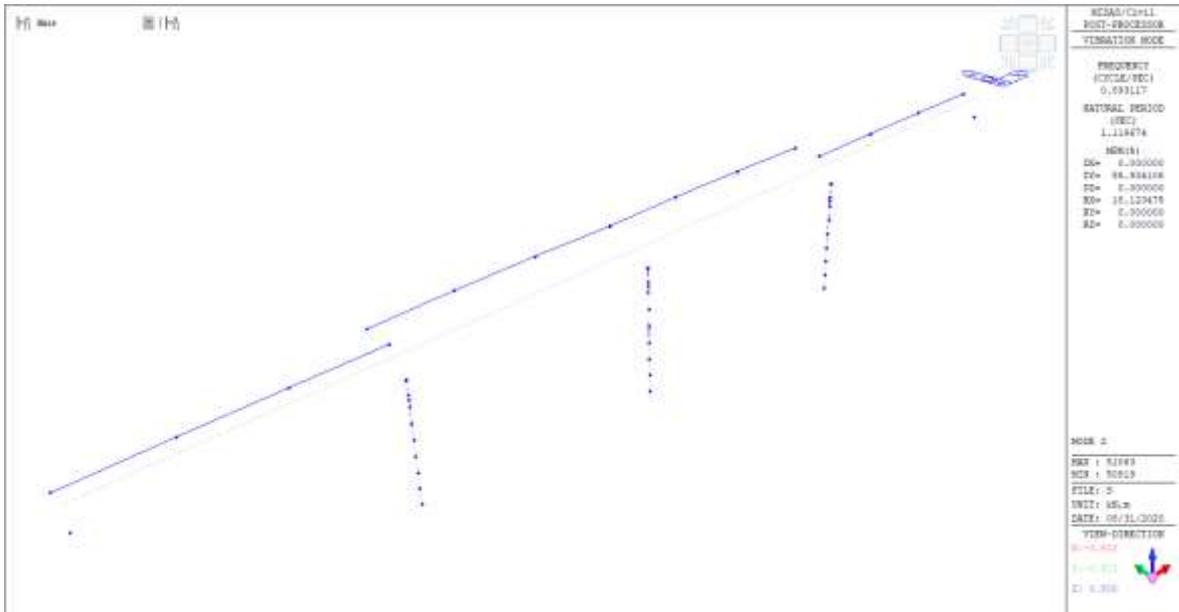


Figura 30: Modo 2

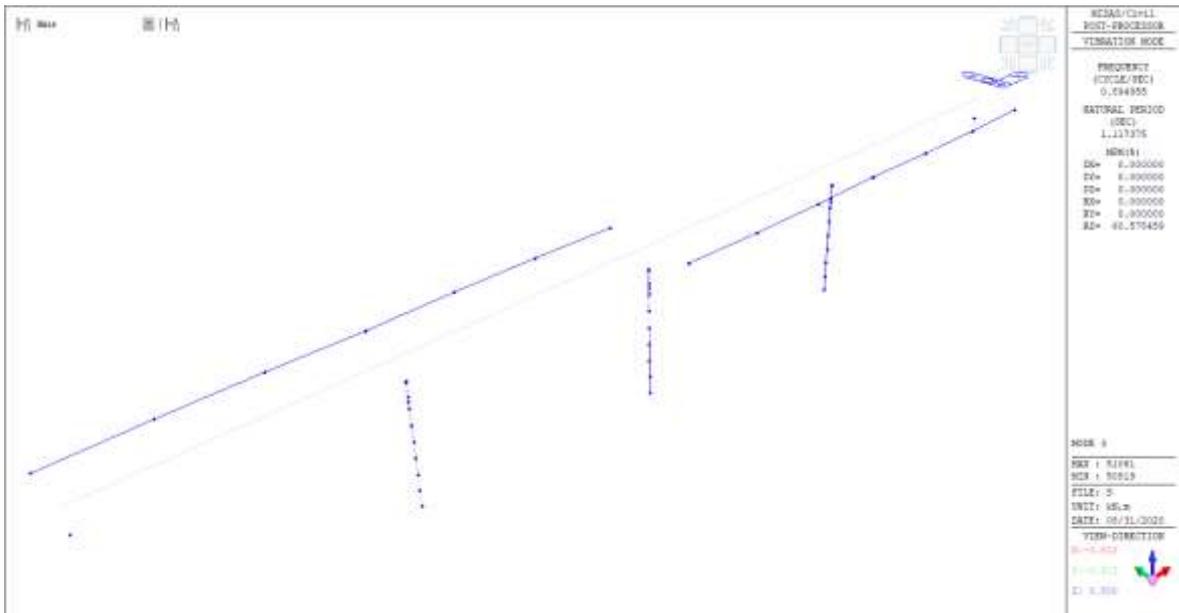


Figura 31: Modo 3

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 53 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

Mode No	Period	TRAN-X		TRAN-Y		ROTN-Z	
	[sec]	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)
1	2.49	68.25	68.25	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.12	0.00	68.25	55.93	55.93	0.00	0.00
3	1.12	0.00	68.25	0.00	55.93	60.58	60.58
4	1.12	0.00	68.25	12.68	68.61	0.00	60.58
5	1.11	0.00	68.25	0.00	68.61	15.11	75.69
6	0.71	0.00	68.25	0.00	68.61	0.00	75.69
7	0.71	0.00	68.25	0.00	68.61	0.00	75.69
8	0.70	0.00	68.25	0.00	68.61	0.00	75.69
9	0.70	0.00	68.25	0.00	68.61	6.10	81.79
10	0.44	0.01	68.25	0.00	68.61	0.00	81.79
11	0.43	0.00	68.25	0.00	68.61	0.00	81.79
12	0.43	0.00	68.25	0.00	68.61	0.00	81.79
13	0.43	0.00	68.26	0.00	68.61	0.00	81.79
14	0.23	0.01	68.26	0.00	68.61	0.00	81.79
15	0.13	0.00	68.27	0.00	68.61	0.00	81.79
16	0.13	0.00	68.27	0.00	68.61	0.00	81.79
17	0.13	0.00	68.27	0.00	68.61	0.00	81.79
18	0.13	0.00	68.27	0.00	68.61	0.00	81.79
19	0.13	0.00	68.27	0.03	68.64	0.00	81.79
20	0.13	0.00	68.27	0.00	68.64	0.03	81.82
21	0.13	0.00	68.27	0.01	68.65	0.00	81.82
22	0.13	0.00	68.27	0.00	68.65	0.01	81.82
23	0.12	0.00	68.27	0.00	68.65	0.00	81.82
24	0.12	8.38	76.65	0.00	68.65	0.00	81.82
25	0.10	0.00	76.65	0.00	68.65	0.00	81.82
26	0.10	16.09	92.74	0.00	68.65	0.00	81.82
27	0.10	0.00	92.74	0.00	68.65	0.00	81.82
28	0.10	0.00	92.74	0.00	68.65	0.00	81.82
29	0.10	0.00	92.74	0.00	68.65	0.00	81.82
30	0.10	0.00	92.74	0.00	68.65	0.00	81.83
31	0.09	0.00	92.74	0.00	68.65	0.00	81.83
32	0.06	0.00	92.74	8.44	77.09	0.00	81.83
33	0.06	0.00	92.74	0.00	77.09	0.00	81.83
34	0.06	0.00	92.74	0.00	77.09	0.00	81.83
35	0.06	0.00	92.74	0.00	77.09	0.00	81.83
36	0.06	0.00	92.74	0.00	77.09	0.00	81.83
37	0.06	0.00	92.74	0.00	77.09	0.00	81.83
38	0.06	0.00	92.74	0.00	77.09	0.00	81.83
39	0.06	0.00	92.74	0.00	77.09	0.00	81.83
40	0.06	0.00	92.74	0.00	77.09	0.00	81.83
41	0.06	0.00	92.74	0.00	77.09	14.38	96.21
42	0.06	0.00	92.74	16.24	93.33	0.00	96.21
43	0.04	0.00	92.74	0.00	93.33	0.00	96.21
44	0.03	0.00	92.74	0.00	93.33	0.00	96.21
45	0.03	0.00	92.74	0.00	93.33	0.00	96.21
46	0.03	0.00	92.74	0.00	93.33	0.00	96.21
47	0.02	0.00	92.74	0.00	93.33	0.00	96.21

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 54 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

Mode No	Period	TRAN-X		TRAN-Y		ROTN-Z	
	[sec]	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)
48	0.02	0.00	92.74	0.00	93.33	0.00	96.21
49	0.02	0.00	92.74	0.00	93.33	0.00	96.21
50	0.02	1.95	94.69	0.00	93.33	0.00	96.21
51	0.02	0.00	94.69	0.00	93.33	0.00	96.21
52	0.02	0.00	94.69	0.00	93.33	0.00	96.21
53	0.02	0.00	94.69	0.00	93.33	0.00	96.21
54	0.02	0.00	94.69	0.00	93.33	0.00	96.21
55	0.02	0.00	94.69	0.00	93.33	0.00	96.21
56	0.02	3.58	98.27	0.00	93.33	0.00	96.21
57	0.02	0.00	98.27	0.00	93.33	0.00	96.21
58	0.02	0.00	98.27	0.00	93.33	0.00	96.21
59	0.02	0.00	98.27	0.00	93.33	0.00	96.21
60	0.02	0.00	98.27	0.00	93.33	0.00	96.21
61	0.01	0.00	98.27	1.84	95.18	0.00	96.21
62	0.01	0.00	98.27	0.00	95.18	2.95	99.16
63	0.01	0.00	98.27	3.33	98.51	0.00	99.16
64	0.01	0.42	98.69	0.00	98.51	0.00	99.16
65	0.01	0.00	98.69	0.00	98.51	0.00	99.16
66	0.01	0.72	99.41	0.00	98.51	0.00	99.16
67	0.01	0.13	99.54	0.00	98.51	0.00	99.16
68	0.01	0.00	99.54	0.36	98.87	0.00	99.16
69	0.01	0.22	99.76	0.00	98.87	0.00	99.16
70	0.01	0.00	99.76	0.00	98.87	0.00	99.16
71	0.01	0.00	99.76	0.62	99.49	0.00	99.16
72	0.01	0.00	99.76	0.00	99.49	0.55	99.71
73	0.01	0.05	99.81	0.00	99.49	0.00	99.71
74	0.01	0.00	99.81	0.00	99.49	0.00	99.71
75	0.00	0.00	99.81	0.00	99.49	0.00	99.71
76	0.00	0.10	99.91	0.00	99.49	0.00	99.71
77	0.00	0.00	99.91	0.00	99.49	0.00	99.71
78	0.00	0.00	99.91	0.00	99.49	0.00	99.71
79	0.00	0.02	99.93	0.00	99.49	0.00	99.71
80	0.00	0.00	99.93	0.11	99.60	0.00	99.71

La somma delle masse relative eccitate dai modo considerati e' superiore al 99% delle masse totali maggiore del 85% come richiesto dalla normativa vigente.

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 55 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

8.2.3 Analisi dinamica non lineare

L'analisi non lineare delle sollecitazioni indotte dal sisma, sulla generica pila e sulle spalle del viadotto, è stata effettuata utilizzando il programma di calcolo agli elementi finiti Midas Civil 2016, che consente il calcolo delle massime sollecitazioni in qualsiasi elemento della struttura sottoposta ad un accelerogramma dato e in presenza di elementi *link non lineari*.

Infine sono stati generati, tramite il software di calcolo citato, tre accelerogrammi di progetto della durata di 25 sec e compatibili con lo spettro di risposta orizzontale di normativa valutati con un coefficiente pari al 5 % e relativi allo SLC.

Si riportano di seguito gli accelerogrammi generati. Infine per ognuno degli accelerogrammi si riporta lo spettro in termini di pseudo-accelerazioni che consente la verifica della coerenza in media con le prescrizioni da normativa.

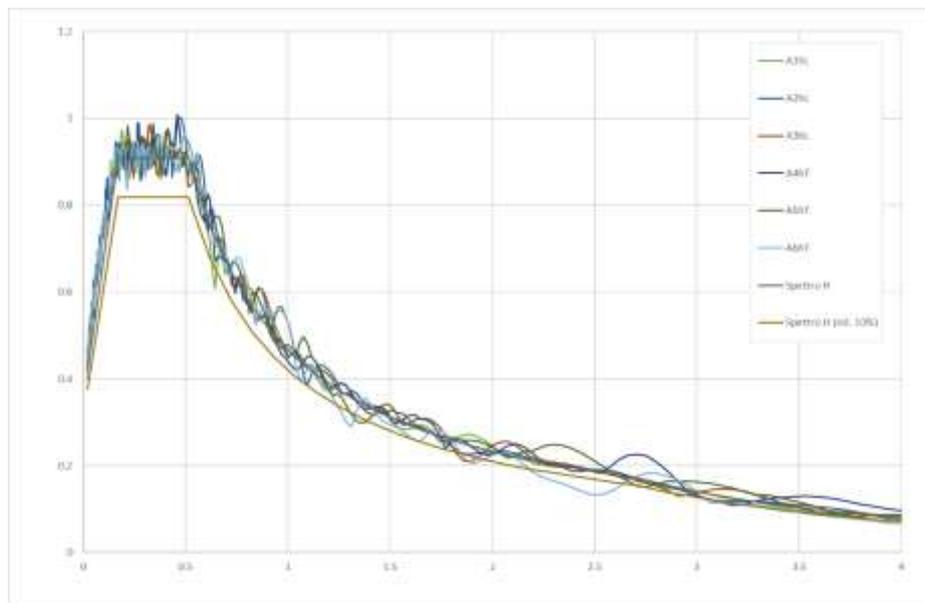


Figura 32 – Accelerogrammi spettrocompatibili

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 56 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

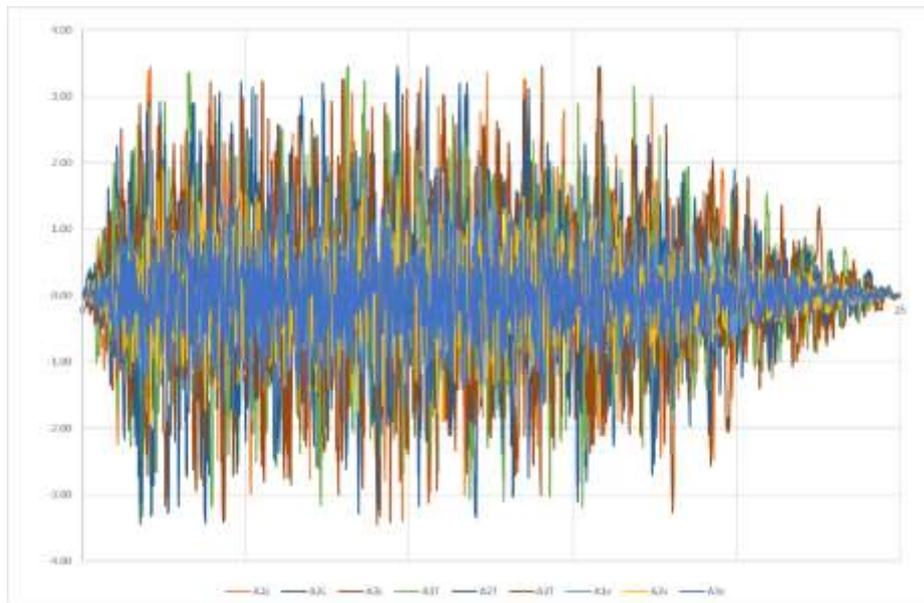


Figura 33 – Spettri associati agli accelerogrammi 1, 2 e 3 e confronto con lo spettro allo SLC

Si è verificato il rispetto delle condizioni di compatibilità imposta di cui dal D.M. 14/01/2008.

8.2.3.1 Risultati dell'analisi in direzione longitudinale

Di seguito si riportano i diagrammi di spostamento e di forza in funzione del tempo, per la durata dell'evento, e il diagramma forza spostamento ottenuto per il modello globale non lineare per effetto di un sisma longitudinale.

Lo spostamento massimo ottenuto con l'analisi non lineare risulta pari a circa 126 mm con riferimento alle condizioni di stato limite di collasso, adottando cioè accelerogrammi compatibili con lo spettro di risposta elastico per lo stato limite di collasso definito dal D.M. 14/01/08 e modificando opportunamente le rigidità degli isolatori.

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud
 4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia
 OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna
 Relazione di calcolo sottostrutture

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id.doc.	N.prog.	Rev.	Pag.di Pag.
L0703	2B	E	12	VI5700	REL	02	B	57 di 98

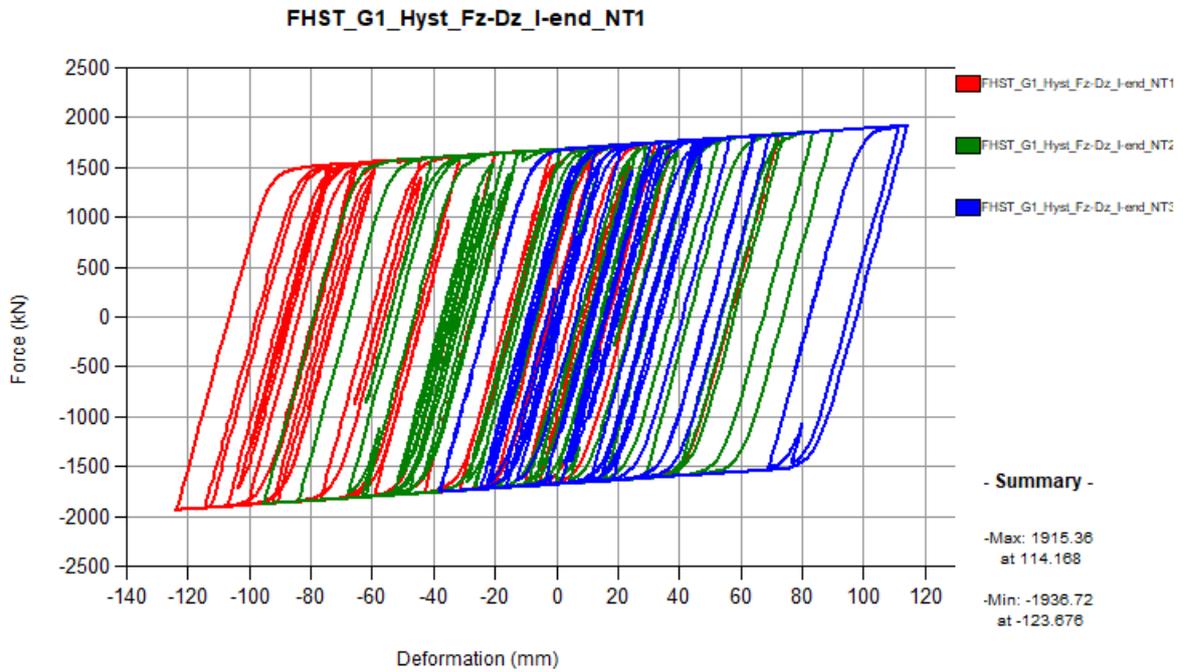


Figura 34 – Legame forza-spostamento nei dispositivi di isolamento longitudinale durante gli eventi sismici 1, 2 e 3

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 58 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

8.2.3.2 Risultati dell'analisi in direzione trasversale

Di seguito si riportano i diagrammi di spostamento e di forza in funzione del tempo, per la durata dell'evento, e il diagramma forza spostamento ottenuto per il modello globale non lineare per effetto di un sisma longitudinale.

Lo spostamento massimo ottenuto con l'analisi non lineare risulta pari a circa 57 mm con riferimento alle condizioni di stato limite di collasso, adottando cioè accelerogrammi compatibili con lo spettro di risposta elastico per lo stato limite di collasso definito dal D.M. 14/01/08 e modificando opportunamente le rigidità degli isolatori.

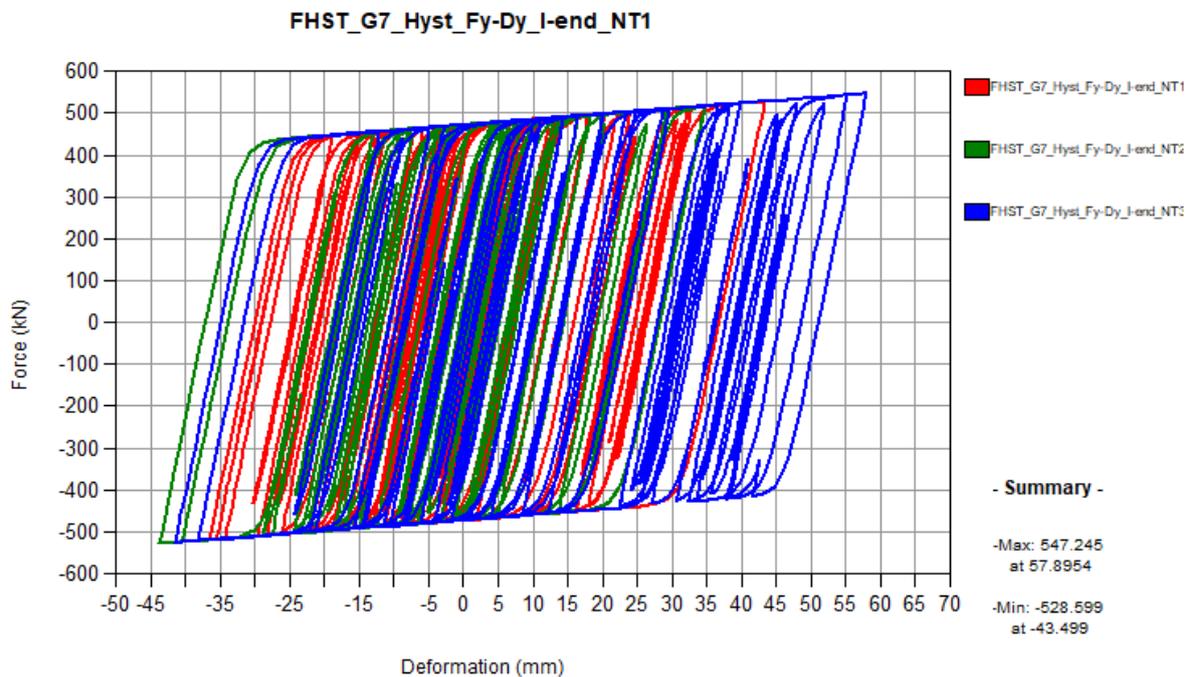


Figura 35 – Legame forza-spostamento nei dispositivi di isolamento trasversale durante gli eventi sismici 1, 2 e 3

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 59 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

8.3 CRITERI GENERALI PER LE VERIFICHE STRUTTURALI

I criteri generali di verifica utilizzati per la valutazione delle capacità resistenti delle sezioni, per la condizione SLU, e per le massime tensioni nei materiali nonché per il controllo della fessurazione, relativamente agli SLE, sono quelli definiti al p.to 4.1.2 del DM 14.01.08.

8.3.1 Verifiche allo SLU

Nelle combinazioni di SLU, si è dunque controllato il rispetto della condizione:

$$S_{Rd}/S_{Ed} \geq 1$$

Con:

- S_{Rd} la capacità resistente della sezione (a pressoflessione /taglio)
- S_{Ed} la sollecitazione di domanda (a pressoflessione/taglio)

I domini di resistenza a pressoflessione delle sezioni in calcestruzzo armato allo SLU sono stati ricavati con il software commerciale PresFle+ distribuito dalla Concrete.

Il valore del taglio resistente è stato invece calcolato in accordo con la normativa attraverso un apposito foglio di calcolo. Nel caso di sezioni armate a taglio, il valore è stato calcolato, cautelativamente, ipotizzando un'inclinazione della biella di calcestruzzo del meccanismo di rottura a taglio pari a 45°.

8.3.2 Verifiche allo SLE

8.3.2.1 Verifica di limitazione delle tensioni in esercizio

La massima tensione di compressione del cls deve rispettare la limitazione:

- $\sigma_c < 0.60 f_{ck}$ per combinazione caratteristica (rara);
- $\sigma_c < 0.45 f_{ck}$ per combinazione quasi permanente.

La massima tensione dell'acciaio deve rispettare la limitazione:

- $\sigma_s < 0.8 f_{yk}$ per combinazione caratteristica.

8.3.2.2 Verifica di fessurazione

Si svolgono le verifiche allo stato limite di apertura delle fessure, verificando che il valore di apertura delle fessure rispetti i valori limite prescritti dalla normativa, a seconda dell'elemento strutturale da verificare, delle condizioni ambientali e della sensibilità delle armature ai fenomeni di corrosione. I limiti di apertura delle fessure sono scelti, a partire dalla classe di esposizione del calcestruzzo, considerando condizioni ambientali aggressive (in accordo con la Tabella 4.2.III del D.M. 14/01/2008 per classi di esposizione XF2, XC4, XA2) e armature poco sensibili ai fenomeni di corrosione. I valori limiti di apertura delle fessure sono:

- $w_1 = 0.2$ mm per combinazione dei carichi quasi permanente;
- $w_2 = 0.3$ mm per combinazione dei carichi frequente.

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 60 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

9. VERIFICA DELLA SPALLA FISSA (S1)

Il modello a mensola utilizzato per il calcolo e la verifica dell'elevazione delle spalle è quello descritto nel paragrafo 7.3. Tutti i muri sono considerati sconnessi fra loro per la valutazione delle sollecitazioni alla base e quindi le azioni provenienti dal modello telaio del viadotto sono applicate solamente al muro frontale. Tale schema pur risultando cautelativo, non fornisce sovrastime eccessive nel calcolo dei quantitativi di armatura previsti.

Per quanto riguarda la platea, si sono effettuate due analisi distinte per lo zoccolo anteriore e per la platea posteriore compresa tra il muro frontale e i muri laterali. Nel primo caso si è considerato un modello tirante-puntone sulla base della massima reazione dei pali, mentre nel secondo caso le sollecitazioni flettenti e taglianti sono state valutate con un modello agli elementi finiti di piastra vincolata con appoggi in corrispondenza del muro frontale e dei muri laterali e soggetta ai carichi verticali dovuti al peso proprio, al peso del terreno di riempimento, e alle azioni verticali dei pali.

Di seguito si riportano le modalità di calcolo delle sollecitazioni e le verifiche di resistenza nei diversi elementi.

9.1 MURO FRONTALE

Si riportano di seguito le tabelle degli scarichi di impalcato testa muro frontale:

Tabella 17– Scarichi dall'impalcato per combinazioni di carico a quota testa muro

TESTA MURO FRONTALE					
Combinazioni	N KN	Mlong kNm	Mtrasv kNm	Tlong KN	Ttrasv KN
ULS_A1_Gr1(max)	7523	0	3329	4	85
ULS_A1_Gr1(min)	3262	0	498	4	87
ULS_A1_Gr2a(max)	6084	0	2330	575	85
ULS_A1_Gr2a(min)	3341	0	428	580	87
ULS_A1_Gr2b(max)	6135	0	2330	2	85
ULS_A1_Gr2b(min)	3391	0	428	2	87
SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	2847	0	0	1932	161
SLV-0.3Ex+Ey+0.3Ez	2830	0	1	584	538
SLV-Ex+0.3Ey+Ez	3087	0	0	601	161
SLS_RA_Gr1(max)	5573	0	2450	3	56
SLS_RA_Gr1(min)	2417	0	353	3	58
SLS_RA_Gr2a(max)	4507	0	1710	426	57
SLS_RA_Gr2a(min)	2475	0	301	429	58
SLS_RA_Gr2b(max)	4544	0	1710	2	57
SLS_RA_Gr2b(min)	2512	0	301	2	58
SLS_FR_Gr1(max)	4544	0	1565	2	1
SLS_FR_Gr1(min)	2512	0	156	2	1
SLS_FR_Gr2a(max)	4507	0	1565	426	1
SLS_FR_Gr2a(min)	2475	0	156	429	1
SLS_FR_Gr2b(max)	4544	0	1565	2	1
SLS_FR_Gr2b(min)	2512	0	156	2	1
SLS_QP	2723	0	0	0	0

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id.doc.	N.prog.	Rev.	Pag.di Pag.
L0703	213	E	12	VI5700	REL	02	B	61 di 98

Per la verifica del muro frontale, a quota spiccato, tali azioni possono essere considerate uniformemente distribuite in quanto l'altezza del muro frontale è tale che n.ell' ipotesi di ripartizione a 45°, tali scarichi si ripartiscono uniformemente alla base del muro

Ai carichi prima riportati, si aggiungono il peso proprio del muro frontale, del muro paraghiaia e la spinta del terreno di riempimento.

Tabella 18 – Valutazioni pesi e spinte agenti sul muro frontale

MURO FRONTALE	
H Muro Frontale	6.70 m
Spessore Muro Frontale	2.50 m
Lunghezza Muro Frontale	13.0 m
Spessore massimo tratto ringrossato	4.20 m
H tratto ringrossato a spessore costante	0.80 m
H tratto a spessore variabile	1.70 m
Altezza media Muro Paraghiaia	2.30 m
Spessore Muro Paraghiaia	0.80 m
Luce mensola muro paraghiaia	1.50 m
Spessore medio mensola muro paraghiaia	0.40 m
Peso Muro Frontale	5514 kN
Peso Muro Paraghiaia	793 kN
Eccentr. appoggi - muro frontale (base)	0.65 m
Eccentr. paraghiaia - muro frontale (base)	-2.55 m
Peso Specifico Terreno di Rilevato	20 kN/mc
Angolo di Attrito Terreno di Rilevato	38 °
Coefficiente di spinta a riposo K_0	0.384
Coefficiente di spinta attiva K_a	0.238
Altezza del rilevato	9.2 m
Spinta a riposo	3503 kN
Spinta attiva	2168 kN
Sovraccarico accidentale da traffico	20 kN/mq
Accelerazione sismica di base a_g	0.220
Coefficiente stratigrafico SS	1.36
Coefficiente topografico ST	1.00
Accelerazione orizzontale massima attesa a_{max}	0.299
β_m (massa cls spalla)	1.000
K_h (cls spalla) =	0.299
K_v (cls spalla)=	0.150
β_m (massa terreno)	1.000
K_h (terreno) =	0.299
K_v (terreno)=	0.150
Coefficiente di spinta attiva con sismiche K'_a (M-O)	0.500
Incr. di spinta attiva in condizione sismiche	2389 kN
Inerzia del Muro Frontale (H)	1650 kN
Inerzia del Muro Paraghiaia (H)	237 kN
Inerzia del Muro Frontale (V)	825 kN
Inerzia del Muro Paraghiaia (V)	119 kN

Si ottenengono quindi le seguenti sollecitazioni, con riferimento alle combinazioni maggiormente significative.

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 62 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	--------------------------

Tabella 19 – Sollecitazioni alla base del muro frontale

BASE MURO FRONTALE					
Combinazioni	N KN	Mlong kNm	Mtrasv kNm	Tlong KN	Ttrasv KN
ULS_A1_Gr1(max)	16037	21416	3899	5761	85
ULS_A1_Gr1(min)	11776	18647	1081	5761	87
ULS_A1_Gr2a(max)	14598	23125	2900	6075	85
ULS_A1_Gr2a(min)	11855	21375	1011	6080	87
ULS_A1_Gr2b(max)	14649	19319	2900	5502	85
ULS_A1_Gr2b(min)	11905	17535	1011	5502	87
SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	9154	40018	3298	8375	727
SLV-0.3Ex+Ey+0.3Ez	9137	16566	10994	4035	2425
SLV-Ex+0.3Ey+Ez	9394	16861	3298	4051	727
SLS_RA_Gr1(max)	11880	15864	2825	4267	56
SLS_RA_Gr1(min)	8724	13813	742	4267	58
SLS_RA_Gr2a(max)	10814	17130	2092	4500	57
SLS_RA_Gr2a(min)	8782	15829	690	4503	58
SLS_RA_Gr2b(max)	10851	14313	2092	4076	57
SLS_RA_Gr2b(min)	8819	12992	690	4076	58
SLS_FR_Gr1(max)	10851	14313	1572	4076	1
SLS_FR_Gr1(min)	8819	12992	163	4076	1
SLS_FR_Gr2a(max)	10814	17130	1572	4500	1
SLS_FR_Gr2a(min)	8782	15829	163	4503	1
SLS_FR_Gr2b(max)	10851	14313	1572	4076	1
SLS_FR_Gr2b(min)	8819	12992	163	4076	1
SLS_QP	9030	10489	0	3503	0

Le sollecitazioni in direzione trasversale risultano trascurabili rispetto a quelle in direzione longitudinale, tenuto anche conto della geometria della sezione del muro frontale. Di seguito si riportano le verifiche di resistenza con riferimento ad una striscia di un metro per le combinazioni che provocano il massimo e il minimo sforzo normale, il massimo momento longitudinale ed il massimo taglio alla base del muro frontale.

Tabella 20 – Geometria sezione e armatura del muro frontale

Muro	Sezione di verifica		Armatura		
	Base [m]	Altezza [m]	Tesa	Compressa	Taglio
Frontale	1.0	2.5	1φ26/10	1φ26/20	1φ12/40x40

Tabella 21 – Verifiche del muro frontale

BASE MURO FRONTALE - Verifiche allo SLU						
Combinazioni		N kN/m	Mlong kNm/m	Tlong kN/m	C.S. (NRd, MRd)	C.S. (VRd)
Max N	ULS_A1_Gr1(max)	1234	1647	443	3.1	3.4
Min N	SLV-0.3Ex+Ey+0.3Ez	703	1274	310	4.0	4.9
Max ML	SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	704	3078	644	1.7	2.4
Max VL	SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	704	3078	644	1.7	2.4

BASE MURO FRONTALE - Verifiche allo SLE							
Combinazioni		N	Mlong	Tlong	σ _c	σ _s	Wk

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 63 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	--------------------------

		kN/m	kNm/m	kN/m	Mpa	Mpa	mm
RARA	SLS_RA_Gr1(max) - Max N	914	1220	328	-2.0	38.2	0.0
	SLS_RA_Gr1(min) - Min N	671	1063	328	-1.7	41.4	0.0
	SLS_RA_Gr2a(max) - Max ML	832	1318	346	-2.1	51.3	0.0
FREQ	SLS_FR_Gr1(max) - Max N	835	1101	314	-1.8	33.8	0.0
	SLS_FR_Gr2a(min) - Min N	676	1218	346	-2.0	54.1	0.0
	SLS_FR_Gr2a(max) - Max ML	832	1318	346	-2.1	51.3	0.0
QP	SLS_QP	695	807	269	-1.3	20.2	0.0

9.2 MURO PARAGHIAIA

In condizioni statiche il muro paraghiaia è sollecitato dalla spinta a riposo del rilevato, dalla spinta dei sovraccarichi accidentali, dai sovraccarichi mobili agenti sulla mensola del muro e dall'azione di frenatura. In condizioni sismiche il muro paraghiaia è sollecitato dalla spinta attiva e sismica del rilevato, dalle masse del muro e della mensola e dall'azione trasmessa dagli isolatori.

La ripartizione degli scarichi degli isolatori è riportata nella figura seguente.



Nella tabella che segue sono indicati parametri geometrici, meccanici e di carico utilizzati nell'analisi. Il modello di calcolo utilizzato è quello di mensola incastrata al muro frontale.

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N,prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 64 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

Tabella 22 – Valutazioni pesi e spinte agenti sul muro paraghiaia

MURO PARAGHIAIA		
Peso Muro Paraghiaia	46	KN/m
Altezza Muro Paraghiaia	2.3	m
Spessore Muro Paraghiaia	0.8	m
Luce mensola del muro paraghiaia	1.50	m
Spessore medio mensola del muro paraghiaia	0.40	m
Altezza Baric. Mensola del Paragh. da spicc. Muro	2.10	m
Peso Mensola Paraghiaia	15	kN
Peso Mensola Paraghiaia	1.154	kN/m
Distanza baricentri (Mensola- Paraghiaia)	1.15	m
Coefficiente di spinta a riposo Ko	0.384	
Coefficiente di spinta attiva Ka	0.238	
Peso Specifico Terreno di Rilevato	20.0	kN/mc
Sovraccarico accidentale da traffico	20.0	kN/mq
Angolo di Attrito Terreno di Rilevato	38.0	
Forza sismica da isolatore (Fultima)	660.0	kN
Distanza isolatore da Testa muro frontale	1.00	m
Larghezza di diffusione Carico isolatore	2.00	m
Spinta a riposo	41.7	kN/m
Spinta attiva	23.7	kN/m
Coefficiente di spinta attiva con sismiche K'a	0.50	
Incr. spinta attiva in condizione sismiche	16.4	kN/m
Inerzia del Muro Paraghiaia /m	14.1	kN/m

Tabella 23 – Geometria sezione e armatura del muro paraghiaia

Muro	Sezione di verifica		Armatura		
	Base [m]	Altezza [m]	Tesa	Compressa	Taglio
Paraghiaia	1.0	0.8	1φ20/10	1φ20/10	1φ12/20x40

Tabella 24 – Verifiche del muro paraghiaia

VERIFICA DI RESISTENZA ALLO SLU/SLV					
Combinazione	N	M	V	C.S. (NRd, MRd)	C.S. (VRd)
	KN/m	kNm/m	KN/m		
SLU	62	57	56	15	8.2
SLV	46	388	384	2.5	1.2

VERIFICHE DI ESERCIZIO						
Combinazione	N	M	V	σ _c	σ _s	W _k
	KN/m	kNm/m	KN/m	Mpa	Mpa	mm
SLE_RARA	46	42	42	-0.5	13	0

Si riporta, infine, la verifica della mensola del muro paraghiaia (a metro lineare), soggetta ad un carico concentrato pari ad un'asse tandem (300 kN) della corsia 1 dello schema di carico 1 previsto dal D.M 14/01/2008. Per la verifica si considera un'altezza media della mensola pari a 0.40 m. Per una fascia di 1 metro di mensola, tenuto conto che il carico del singolo asse tandem è suddiviso in due aree di impronta da 0.40 m x 0.40 m poste ad interasse trasversale pari a 2.0 m, si considera un effetto di diffusione a 45° del carico nello spessore della pavimentazione (0.10 m) e nel

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 65 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

semispessore medio della mensola stessa (0.20 m) che consente di ripartire il carico su una larghezza di $2.4 + 2 \cdot (0.1 + 0.2) = 3.0$ m.

Lo schema statico è quello di mensola di lunghezza pari ad 1.50 m, con forza concentrata di $300/3.0=100$ kN applicata ad 1.30 m dall'incastro (tenendo conto della larghezza dell'impronta del carico pari a 0.40 m). A tale effetto va sommato il contributo del peso proprio della mensola e della pavimentazione che, complessivamente, forniscono un carico di 13.0 kN/m lungo la mensola.

Tabella 25 – Geometria sezione e armatura della mensola del muro paraghiaia

Muro	Sezione di verifica		Armatura		
	Base [m]	Altezza media [m]	Tesa	Compressa	Taglio
Mensola Paraghiaia	1.0	0.40	1φ20/10	1φ20/10	Spilli φ12/40x40

VERIFICHE DI ESERCIZIO MENSOLA PARAGHIAIA						
Combinazione	N	M	V	σ_c	σ_s	Wk
	KN/m	kNm/m	KN/m	Mpa	Mpa	mm
SLE_RARA	0	141.0	113	-6.18	159	0.084

VERIFICA DI RESISTENZA ALLO SLU/SLV					
Combinazione	N	M	V	C.S. (NRd, MRd)	C.S. (VRd)
	KN/m	kNm/m	KN/m		
SLU	0	189.8	151.9	1.90	1.39

9.3 MURI LATERALI

In questo paragrafo si riporta il calcolo dei muri laterali della spalla. Tali muri sono sollecitati essenzialmente dalle spinte del terreno di riempimento all'interno della spalla e dei sovraccarichi presenti su di esso in condizioni statiche e sismiche.

Nella tabella che segue sono indicati i parametri geometrici, meccanici e di carico utilizzati nell'analisi. Il modello di calcolo utilizzato è quello di mensola incastrata al muro frontale.

Tabella 26 – Valutazioni pesi e spinte agenti sui muri laterali

MURI LATERALI	
Muro laterale H1	4.00 m
Muro laterale s1	1.50 m
Muro laterale H2	2.70 m
Muro laterale s2	1.00 m
Muro laterale H3	1.98 m
Muro laterale s3	0.50 m
Altezza totale muri laterali	8.68 m
Spessore medio Muri Laterali	1.12 m
Lunghezza Massima muri laterali	7.00 m
Peso Muro laterale (singolo)	1696 kN
Peso totale Muri laterali	3392 kN
Spinta a riposo (con 100% sovraccarichi)	369.8 kN/m
Spinta a riposo (con 50% sovraccarichi)	336.4
Spinta attiva	220.9 kN/m
Coefficiente di spinta attiva con sismiche K'a	0.50
Incr. spinta attiva in condizione sismiche	206.7 kN/m

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 66 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

Inerzia del Muro laterale /m

72 kN/m

Tabella 27 – Geometria sezione e armatura dei muri laterali

Muro	Sezione di verifica		Armatura		
	Base [m]	Altezza [m]	Tesa	Compressa	Taglio
Laterale	1.0	1.5	1φ30/10	1φ26/20	Φ12/40x40
Laterale	1.0	1.0	1φ22/10	1φ20/20	Φ12/40x40
Laterale	1.0	0.5	1φ20/10	1φ20/20	Φ12/40x40

Per quanto concerne le verifiche dei muri laterali si rimanda ai muri della spalla mobile, che risultano maggiormente sollecitati

9.4 PLINTO DI FONDAZIONE

In questo paragrafo si riporta la determinazione delle sollecitazioni in quota testa pali che si ottengono sommando, alle azioni provenienti dall'impalcato, la risultante e il momento risultante dei pesi della struttura, del terreno interno alla spalla e delle spinte dovute al rilevato rispetto al baricentro del plinto. In condizioni sismiche si è tenuto conto dell'incremento di spinta delle inerzie

Nella tabella che segue sono indicati i parametri geometrici, meccanici e di carico del plinto utilizzati nell'analisi per il calcolo della risultante e momento risultante rispetto al baricentro del plinto di fondazione. L'azione orizzontale derivante dall'impalcato è stata considerata sia con verso concorde che discorde alla spinta del terreno di rinterro.

Tabella 28 – Valutazioni pesi e spinte agenti sul plinto di fondazione

PLINTO DI FONDAZIONE	
Eccentricità long Muri laterali -Plinto	-2.5 m
Peso Muro Frontale	5514 kN
Ecc. Long. Muro Frontale - Plinto	2.25 m
Ecc.Appoggi Plinto	2.90 m
Peso Muro Paraghiaia	793 m
Ecc. Long. Muro Paraghiaia - Plinto	-0.30 kN
Peso Terreno Interno	12569 kN
Peso Accidentali	1141 kN
Eccentricità long Terreno -Plinto	-2.5 m
Spessore Plinto	2.2 m
Lunghezza plinto	12 m
Larghezza plinto	14 m
Peso plinto di fondazione	9240
Altezza Rilevato+H plinto	11.4 m
Spinta a riposo rilevato	6493 kN
Spinta a riposo sovraccarichi	1139 kN
Spinta attiva rilevato	4724 kN
Incremento spinta sismica	4428 kN
Inerzia dei muri laterali (H)	1015 kN
Inerzia dei muri laterali (V)	507 kN
Inerzia plinto di fondazione (H)	2765 kN
Inerzia plinto di fondazione (V)	1382 kN
Inerzia rilevato interno(H)	3761 kN
Inerzia rilevato interno (V)	1880 kN



2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 67 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 68 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	--------------------------

Tabella 29 – Sollecitazioni ad intradosso plinto (quota testa pali)

(tali azioni sono comprensive dell'azione della frana in direzione trasversale al viadotto)

AZIONI FRANA	
peso terreno frana =	19 kN/mc
Spessore coltre frana =	5.0 m
Direz. Frana =	Trasversale
coeff. di spinta =	riposo
Spinta =	164.11 kN/m
Taglio testa pali =	2297.518494 kN

SOLLECITAZIONI BASE PLINTO							
Combo	N [kN]	V _L [kN]	V _T [kN]	M _L [kNm]	M _T [kNm]	M _{L,ΔM} [kNm]	M _{T,ΔM} [kNm]
ULS_A1_Gr1(max)	-51598	10308	3187	26491	4086	60610	14633
ULS_A1_Gr1(min)	-47337	10308	3189	14134	1272	48253	11827
ULS_A1_Gr2a(max)	-49774	10494	3187	25208	3087	59945	13634
ULS_A1_Gr2a(min)	-47031	10499	3189	17298	1202	52051	11757
ULS_A1_Gr2b(max)	-49825	9921	3187	20256	3087	53096	13634
ULS_A1_Gr2b(min)	-47081	9921	3189	12299	1202	45139	11757
SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	-35768	20511	5287	90186	15552	158077	33052
SLV-0.3Ex+Ey+0.3Ez	-35751	9465	12262	25987	51841	57317	92429
SLV-Ex+0.3Ey+Ez	-39308	9481	5287	26898	15552	58281	33052
SLS_RA_Gr1(max)	-38221	7636	56	19624	2948	44898	3134
SLS_RA_Gr1(min)	-35065	7636	58	10472	869	35745	1061
SLS_RA_Gr2a(max)	-36870	7774	57	18674	2217	44405	2406
SLS_RA_Gr2a(min)	-34838	7777	58	12808	817	38549	1009
SLS_RA_Gr2b(max)	-36907	7350	57	15008	2217	39335	2406
SLS_RA_Gr2b(min)	-34875	7350	58	9115	817	33443	1009
SLS_FR_Gr1(max)	-36907	7350	1	15008	1574	39335	1577
SLS_FR_Gr1(min)	-34875	7350	1	9115	165	33443	168
SLS_FR_Gr2a(max)	-36870	7774	1	18674	1574	44405	1577
SLS_FR_Gr2a(min)	-34838	7777	1	12808	165	38549	168
SLS_FR_Gr2b(max)	-36907	7350	1	15008	1574	39335	1577
SLS_FR_Gr2b(min)	-34875	7350	1	9115	165	33443	168
SLS_QP	-34230	6493	0	4839	0	26332	0

Per la valutazione delle sollecitazioni nel plinto di fondazione, è necessario valutare preventivamente le sollecitazioni agenti nei pali di fondazione. Tali sollecitazioni sono state valutate mediante una ripartizione rigida delle sollecitazioni agenti a base plinto. Nel calcolo degli sforzi nei pali si è tenuto del parametro α (vedi paragrafo 4) sia per la valutazione dello sforzo nei pali (effetto della deformabilità a taglio degli stessi pali) sia per la valutazione del momento flettente agente in testa al palo ($M_{Ed} = \alpha V_{Ed}$). La situazione peggiore risulta essere sempre quella sismica.

Si riportano nel seguito le coordinate dei pali di fondazione e per ogni combinazione di carico, le sollecitazioni nei pali sollecitati dal massimo e dal minimo sforzo normale.

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N,prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 69 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

Tabella 30 – Numero di pali e coordinate rispetto al baricentro del plinto

	Pali								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
z	-4.50	0.00	4.50	-4.50	0.00	4.50	-4.50	0.00	4.50
y	5.50	5.50	5.50	0.00	0.00	0.00	-5.50	-5.50	-5.50
z ²	20.25	0.00	20.25	20.25	0.00	20.25	20.25	0.00	20.25
y ²	30.25	30.25	30.25	0.00	0.00	0.00	30.25	30.25	30.25
W _y	33.00	33.00	33.00	0.00	0.00	0.00	-33.00	-33.00	-33.00
W _z	-27.00	0.00	27.00	-27.00	0.00	27.00	-27.00	0.00	27.00

Tabella 31 – Massime e minime sollecitazioni nei pali di fondazione

Combo	SFORZI MASSIMI E MINIMI NEI PALI					
	Palo	N _{min}	Palo	N _{max}	V _{max} [kN]	M _{max} [kNm]
		[kN]		[kN]		
ULS_A1_Gr1(max)	7	-6838	3	-4628	1199	3968
ULS_A1_Gr1(min)	7	-5822	3	-4698	1199	3968
ULS_A1_Gr2a(max)	7	-6558	3	-4503	1219	4034
ULS_A1_Gr2a(min)	7	-5903	3	-4549	1219	4036
ULS_A1_Gr2b(max)	7	-6380	3	-4692	1158	3832
ULS_A1_Gr2b(min)	7	-5723	3	-4739	1158	3833
SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	7	-7786	3	-163	2354	7790
SLV-0.3Ex+Ey+0.3Ez	7	-6506	3	-1439	1721	5697
SLV-Ex+0.3Ey+Ez	7	-5835	3	-2900	1206	3992
SLS_RA_Gr1(max)	7	-5063	3	-3431	848	2808
SLS_RA_Gr1(min)	7	-4310	3	-3482	848	2808
SLS_RA_Gr2a(max)	7	-4855	3	-3338	864	2859
SLS_RA_Gr2a(min)	7	-4370	3	-3372	864	2860
SLS_RA_Gr2b(max)	7	-4724	3	-3478	817	2703
SLS_RA_Gr2b(min)	7	-4237	3	-3513	817	2703
SLS_FR_Gr1(max)	7	-4704	3	-3497	817	2703
SLS_FR_Gr1(min)	7	-4218	3	-3532	817	2703
SLS_FR_Gr2a(max)	7	-4836	3	-3357	864	2859
SLS_FR_Gr2a(min)	7	-4350	3	-3392	864	2860
SLS_FR_Gr2b(max)	7	-4704	3	-3497	817	2703
SLS_FR_Gr2b(min)	7	-4218	3	-3532	817	2703
SLS_QP	1	-3983	3	-3624	721	2388

Il tacco anteriore del plinto di fondazione è stato verificato ipotizzando un meccanismo di tirante puntone. Si riporta di seguito la verifica. La larghezza di diffusione è stata valutata in corrispondenza del filo anteriore del muro frontale, mediante una diffusione a 45° a partire dal piano medio del palo (vedi figura seguente), mentre l'altezza della biella compressa è stata valutata pari a 0.2 d_p (con d_p altezza utile della sezione del plinto). La verifica è stata eseguita in corrispondenza del palo più sollecitato (generalmente quello di spigolo).

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 70 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

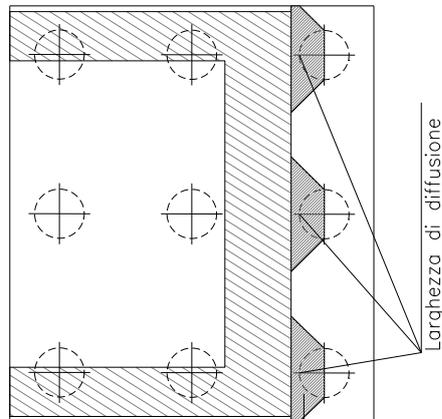


Figura 36 – Diffusione delle azioni dal palo al muro frontale

Tabella 32 – Verifica dello zoccolo anteriore del plinto di fondazione con meccanismo tirante-puntone

VERIFICA DELLO ZOCOLO ANTERIORE DEL PLINTO DI FONDAZIONE	
Nmax (palo)	7786 kN
Dist. Asse palo-bordo muro frontale	1.00 m
Diametro palo	1.50 m
Larghezza di diffusione	3.00 m
Spessore della Fondazione	2.20 m
Copriferro nominale	0.05 m
Altezza utile della sezione	2.11 m
Altezza della biella compressa	0.4 m
Sforzo di Trazione	4610 kN
Sforzo di compressione	9048 kN
Diametro armatura primo strato	26 mm
Passo armatura primo strato	10 cm
Diametro armatura secondo strato	26 mm
Passo armatura secondo strato	20 cm
Area complessiva delle armature	23892 mm ²
Tensione nel calcestruzzo	7.1 Mpa
Tensione nell'acciaio	193.0 Mpa

Per quanto concerne la verifica della parte di plinto racchiusa dal muro frontale e dai muri laterali, è stata eseguita implementando un modello di piastra agli elementi finiti mediante il programma FEM Midas Civil. La piastra è stata ipotizzata incastrata in corrispondenza dei muri in elevazione e sollecitata dal terrapieno e dai pali di fondazione.

Si riportano nel seguito le mappe delle sollecitazioni con riferimento agli scarichi massimi nei pali e le verifiche di resistenza.

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

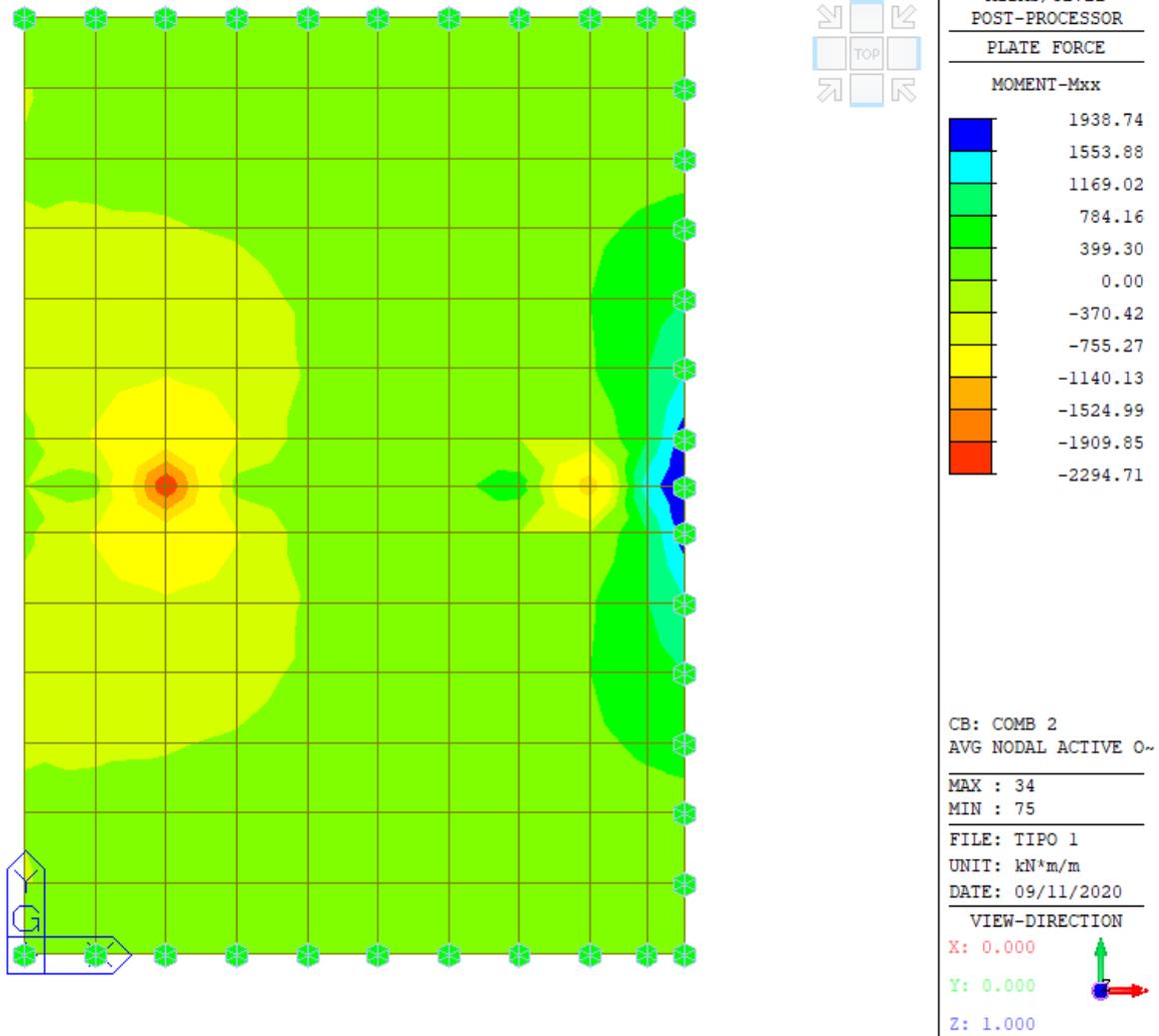
3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 71 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------



Mxx (direzione trasversale)

Direzione trasversale (In corrispondenza dei muri laterali)

$M_{xx} = 1600 \text{ kNm}$

$A_{sup} = 1 \phi 26/20$

$A_{inf} = 1 \phi 26/20$

C.S = 1.35

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

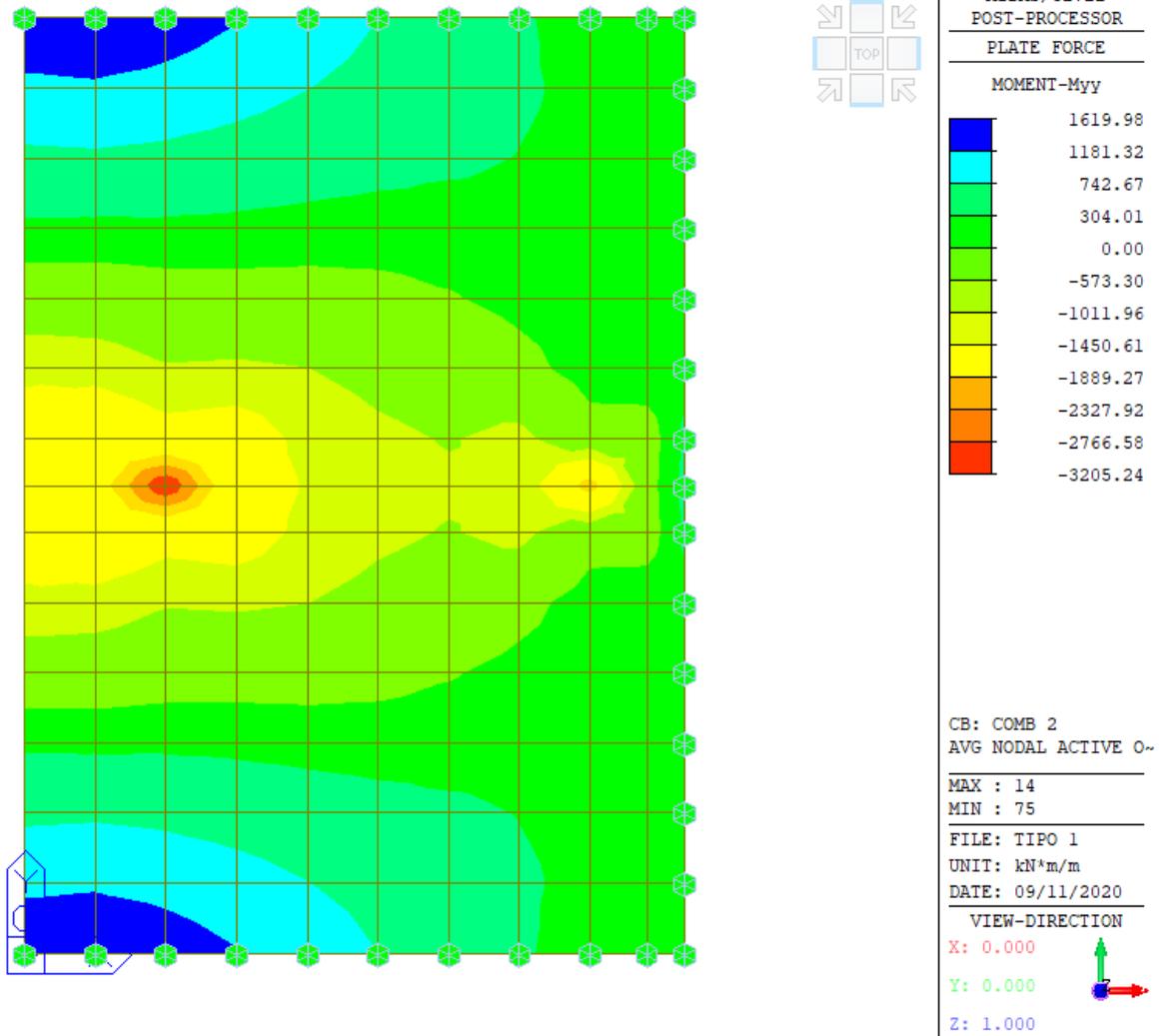
3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 72 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------



Myy (direzione longitudinale)

Direzione longitudinale (In corrispondenza del muro frontale)

$M_{yy} = 1900 \text{ kNm}$

$A_{sup} = 1\phi 26/20$

$A_{inf} = 1\phi 26/20$

C.S = 1.13

9.5 PALI DI FONDAZIONE

Le sollecitazioni agenti nei pali di fondazione, sono state valutate mediante una ripartizione rigida delle sollecitazioni globali agenti a quota testa pali e in corrispondenza del baricentro del plinto di fondazione. Il valore del momento flettente agente in testa ai pali, è stato ottenuto moltiplicando il taglio in testa per il parametro “ α ” riportato al par. 4.3.

Si riportano di seguito le sollecitazioni e le verifiche di resistenza per le varie combinazioni di carico, e per i pali soggetti al massimo e al minimo sforzo normale.

L'individuazione dei pali a cui corrispondono tali sollecitazioni può essere effettuata mediante le tabelle riportate nel paragrafo precedente. Confrontando il massimo sforzo di compressione agente nei pali con i valori riportate nelle curve di capacità portante dei pali (vedi Relazione Geotecnica Generale sulle Opere all'aperto e Gallerie Artificiali), si è scelto di utilizzare dei pali aventi **lunghezza pari a 25 m**.

Le armature longitudinali consistono in una gabbia costituita da un primo strato di 20+20 ϕ 30 ed un secondo strato di 20 ϕ 30 longitudinali e da una spirale ϕ 14/10 prevedendo una opportuna riduzione lungo il fusto del palo.

Tabella 33 – Verifica dei pali di fondazione

Palo	Sezione di verifica	Armatura	
	D [m]	Armatura longitudinale	Taglio
Φ 1500	1.5	20+20 ϕ 30 - 20 ϕ 30	Spirale ϕ 14/10

PALO - Verifiche allo SLU						
Combinazioni		N kN	Mlong kNm	Tlong kN	C.S. (NRd, MRd)	C.S. (VRd)
Max N	SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	-7786	7790	2354	1.18	1.4
Min N	SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	-163	7790	2354	1.1	1.4
Max VL	SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	-163	7790	2354	1.1	1.4

PALO - Verifiche allo SLE							
Combinazioni		N	Mlong	Tlong	σ_c	σ_s	Wk
		kN	kNm	kN	Mpa	Mpa	mm
RARA	SLS_RA_Gr1(max)	-5063	2808	848	-8.4	68.1	-
	SLS_RA_Gr2a(max)	-3338	2859	864	-8.2	102.8	-
FREQ	SLS_FR_Gr2a(max)	-4836	2859	864	-8.4	74.7	-
	SLS_FR_Gr2a(max)	-3357	2859	864	-8.2	102.4	-
QP	SLS_QP	-3983	2388	721	-7.0	63.3	-
	SLS_QP	-3624	2388	721	-7.0	69.7	-

9.5.1 Verifiche geotecniche di capacità portante

Confrontando il massimo sforzo di compressione agente nei pali con i valori riportate nelle curve di capacità portante dei pali (vedi Relazione Geotecnica Generale sulle Opere all'aperto e Gallerie Artificiali), si è scelto di utilizzare dei pali aventi le seguenti lunghezze:

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 74 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	--------------------------

PALI S.ANNA - SPALLE (N>O COMPRESSIONE)													PORTANZA VERTICALE SPALLE - COMB. A1-M1-R3					
SPALLA	L _{imp}	H _{muro front}	D _{pali}	n°pali	L _{pali}	N _{max,SLU}	N _{max,SLV}	N _{max,SLE}	N _{min,SLU}	N _{min,SLV}	V _{max}	M _{max}	Qd,c	FS	QLL	FS	Qd,t	FS
	[m]	[m]	[m]	[-]	[m]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[-]	[kN]	[-]	[kN]	[-]
FISSA	25.00	6.70	1.50	9	25	6838	7786	5063	4503	163	2354	7790	8740	1.12	10034	1.98	5373	-
MOBILE	25.00	7.60	1.50	9	25	7641	8316	5657	5555	753	2427	8033	8740	1.05	10034	1.77	5873	-

10. VERIFICA DELLA SPALLA MOBILE (S2)

Il calcolo della spalla mobile è eseguito analogamente a quanto mostrato per la spalla fissa. Si riportano quindi risultati e le verifiche di resistenza nei diversi elementi.

10.1 MURO FRONTALE

Si riportano di seguito le tabelle degli scarichi di impalcato testa muro frontale:

Tabella 34– Scarichi dall'impalcato per combinazioni di carico a quota testa muro

TESTA MURO FRONTALE					
Combinazioni	N KN	Mlong kNm	Mtrasv kNm	Tlong KN	Ttrasv KN
ULS_A1_Gr1(max)	7523	0	3327	0	84
ULS_A1_Gr1(min)	3263	0	498	0	87
ULS_A1_Gr2a(max)	6185	0	2329	0	85
ULS_A1_Gr2a(min)	3441	0	428	0	87
ULS_A1_Gr2b(max)	6134	0	2329	0	85
ULS_A1_Gr2b(min)	3391	0	428	0	87
SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	2828	0	0	0	161
SLV-0.3Ex+Ey+0.3Ez	2824	0	1	0	538
SLV-Ex+0.3Ey+Ez	3081	0	0	0	161
SLS_RA_Gr1(max)	5572	0	2449	0	56
SLS_RA_Gr1(min)	2417	0	353	0	58
SLS_RA_Gr2a(max)	4581	0	1709	0	57
SLS_RA_Gr2a(min)	2549	0	301	0	58
SLS_RA_Gr2b(max)	4544	0	1709	0	57
SLS_RA_Gr2b(min)	2512	0	301	0	58
SLS_FR_Gr1(max)	4544	0	1564	0	1
SLS_FR_Gr1(min)	4544	0	1564	0	0
SLS_FR_Gr2a(max)	4581	0	1564	0	1
SLS_FR_Gr2a(min)	4581	0	1564	0	0
SLS_FR_Gr2b(max)	4544	0	1564	0	1
SLS_FR_Gr2b(min)	4544	0	1564	0	0
SLS_QP	2723	0	0	0	0

Per la verifica del muro frontale, a quota spiccato, tali azioni possono essere considerate uniformemente distribuite in quanto l'altezza del muro frontale è tale che n.ell' ipotesi di ripartizione a 45°, tali scarichi si ripartiscono uniformemente alla base del muro

Ai carichi prima riportati, si aggiungono il peso proprio del muro frontale, del muro paraghiaia e la spinta del terreno di riempimento.

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 76 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

Tabella 35 – Valutazioni pesi e spinte agenti sul muro frontale

MURO FRONTALE	
H Muro Frontale	7.60 m
Spessore Muro Frontale	2.50 m
Lunghezza Muro Frontale	13.0 m
Spessore massimo tratto ringrossato	0.00 m
H tratto ringrossato a spessore costante	0.00 m
H tratto a spessore variabile	0.00 m
Altezza media Muro Paraghiaia	2.36 m
Spessore Muro Paraghiaia	0.50 m
Luce mensola muro paraghiaia	0.30 m
Spessore medio mensola muro paraghiaia	0.30 m
Peso Muro Frontale	6175 kN
Peso Muro Paraghiaia	413 kN
Eccentr. appoggi - muro frontale (base)	0.65 m
Eccentr. paraghiaia - muro frontale (base)	-1.00 m
Peso Specifico Terreno di Rilevato	20 kN/mc
Angolo di Attrito Terreno di Rilevato	38 °
Coefficiente di spinta a riposo K_0	0.384
Coefficiente di spinta attiva K_a	0.238
Altezza del rilevato	10.16 m
Spinta a riposo	4307 kN
Spinta attiva	2665 kN
Sovraccarico accidentale da traffico	20 kN/mq
Accelerazione sismica di base a_g	0.220
Coefficiente stratigrafico SS	1.36
Coefficiente topografico ST	1.00
Accelerazione orizzontale massima attesa a_{max}	0.299
β_m (massa cls spalla)	1.000
K_h (cls spalla) =	0.299
K_v (cls spalla)=	0.150
β_m (massa terreno)	1.000
K_h (terreno) =	0.299
K_v (terreno)=	0.150
Coefficiente di spinta attiva con sismiche K'_a (M-O)	0.50
Incr. di spinta attiva in condizione sismiche	2937 kN
Inerzia del Muro Frontale (H)	1848 kN
Inerzia del Muro Paraghiaia (H)	123 kN
Inerzia del Muro Frontale (V)	924 kN
Inerzia del Muro Paraghiaia (V)	62 kN

Si ottenengono quindi le seguenti sollecitazioni, con riferimento alle combinazioni maggiormente significative.

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 77 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	--------------------------

Tabella 36 – Sollecitazioni alla base del muro frontale

BASE MURO FRONTALE					
Combinazioni	N KN	Mlong kNm	Mtrasv kNm	Tlong KN	Ttrasv KN
ULS_A1_Gr1(max)	16416	29836	3965	6958	84
ULS_A1_Gr1(min)	12156	27067	1159	6958	87
ULS_A1_Gr2a(max)	15078	27513	2975	6672	85
ULS_A1_Gr2a(min)	12334	25729	1089	6672	87
ULS_A1_Gr2b(max)	15027	27480	2975	6672	85
ULS_A1_Gr2b(min)	12284	25697	1089	6672	87
SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	9416	33478	3658	7574	753
SLV-0.3Ex+Ey+0.3Ez	9412	17357	12194	4138	2509
SLV-Ex+0.3Ey+Ez	9669	17525	3658	4138	753
SLS_RA_Gr1(max)	12160	22100	2875	5154	56
SLS_RA_Gr1(min)	9005	20050	794	5154	58
SLS_RA_Gr2a(max)	11169	20380	2142	4942	57
SLS_RA_Gr2a(min)	9137	19059	742	4942	58
SLS_RA_Gr2b(max)	11132	20355	2142	4942	57
SLS_RA_Gr2b(min)	9100	19035	742	4942	58
SLS_FR_Gr1(max)	11132	20355	1572	4942	1
SLS_FR_Gr1(min)	11132	20355	1564	4942	0
SLS_FR_Gr2a(max)	11169	20380	1572	4942	1
SLS_FR_Gr2a(min)	11169	20380	1564	4942	0
SLS_FR_Gr2b(max)	11132	20355	1572	4942	1
SLS_FR_Gr2b(min)	11132	20355	1564	4942	0
SLS_QP	9311	15942	0	4307	0

Le sollecitazioni in direzione trasversale risultano trascurabili rispetto a quelle in direzione longitudinale, tenuto anche conto della geometria della sezione del muro frontale. Di seguito si riportano le verifiche di resistenza con riferimento ad una striscia di un metro per le combinazioni che provocano il massimo e il minimo sforzo normale, il massimo momento longitudinale ed il massimo taglio alla base del muro frontale.

Tabella 37 – Geometria sezione e armatura del muro frontale

Muro	Sezione di verifica		Armatura		
	Base [m]	Altezza [m]	Tesa	Compressa	Taglio
Frontale	1.0	2.5	1φ26/10	1φ26/20	Φ12/40x40

Tabella 38 – Verifiche del muro frontale

BASE MURO FRONTALE - Verifiche allo SLU						
Combinazioni		N kN/m	Mlong kNm/m	Tlong kN/m	C.S. (NRd, MRd)	C.S. (VRd)
Max N	ULS_A1_Gr1(max)	1263	2295	535	2.4	2.8
Min N	ULS_A1_Q5c(max)	684	1807	513	2.8	3.0
Max ML	SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	724	2575	583	2.0	2.6
Max VL	SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	724	2575	583	2.0	2.6

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 78 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	--------------------------

BASE MURO FRONTALE - Verifiche allo SLE							
Combinazioni		N	Mlong	Tlong	σ_c	σ_s	Wk
		kN/m	kNm/m	kN/m	Mpa	Mpa	mm
RARA	SLS_RA_Gr1(max) - Max N	935	1700	396	-3.2	75.0	0.0
	SLS_RA_Gr1(min) - Min N	693	1542	396	-2.9	79.2	0.0
	SLS_RA_Gr1(max) - Max ML	935	1700	396	-3.2	75.0	0.0
FREQ	SLS_FR_Gr2a(max) - Max N	859	1568	380	-2.9	69.4	0.0
	SLS_FR_Gr1(max) - Min N	856	1566	380	-2.9	69.5	0.0
	SLS_FR_Gr2a(max) - Max ML	859	1568	380	-2.9	69.4	0.0
QP	SLS_QP	716	1226	331	-2.3	51.3	0.0

10.2 MURO PARAGHIAIA

In condizioni statiche il muro paraghiaia è sollecitato dalla spinta a riposo del rilevato, dalla spinta dei sovraccarichi accidentali, dai sovraccarichi mobili agenti sulla mensola del muro e dall'azione di frenatura. In condizioni sismiche il muro paraghiaia è sollecitato dalla spinta attiva e sismica del rilevato, dalle masse del muro e della mensola.

Nella tabella che segue sono indicati i parametri geometrici, meccanici e di carico utilizzati nell'analisi. Il modello di calcolo utilizzato è quello di mensola incastrata al muro frontale.

Tabella 39 – Valutazioni pesi e spinte agenti sul muro paraghiaia

MURO PARAGHIAIA		
Peso Muro Paraghiaia	30	KN/m
Altezza Muro Paraghiaia	2.36	m
Spessore Muro Paraghiaia	0.5	m
Luce mensola del muro paraghiaia	0.30	m
Spessore medio mensola del muro paraghiaia	0.30	m
Altezza Baric. Mensola del Paragh. da spicc. Muro	2.21	m
Peso Mensola Paraghiaia	2.25	kN
Peso Mensola Paraghiaia	0.173	kN/m
Distanza baricentri (Mensola- Paraghiaia)	0.40	m
Coefficiente di spinta a riposo K_0	0.384	
Coefficiente di spinta attiva K_a	0.238	
Peso Specifico Terreno di Rilevato	20.0	kN/mc
Sovraccarico accidentale da traffico	20.0	kN/mq
Angolo di Attrito Terreno di Rilevato	38.0	
Spinta a riposo	43.3	kN/m
Spinta attiva	24.7	kN/m
Coefficiente di spinta attiva con sismiche K'_a	0.50	
Incr. spinta attiva in condizione sismiche	17.2	kN/m
Inerzia del Muro Paraghiaia /m	8.9	kN/m

Tabella 40 – Geometria sezione e armatura del muro paraghiaia

Muro	Sezione di verifica		Armatura		
	Base [m]	Altezza [m]	Tesa	Compressa	Taglio
Paraghiaia	1.0	0.5	1 ϕ 16/10	1 ϕ 16/20	- ϕ 12/40x40

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 79 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

Tabella 41 – Verifiche del muro paraghiaia

VERIFICA DI RESISTENZA ALLO SLU/SLV					
Combinazione	N	M	V	C.S. (NRd, MRd)	C.S. (VRd)
	KN/m	kNm/m	KN/m		
SLU	40	60	58	10	4.7
SLV	30	54	51	10	5.3

VERIFICHE DI ESERCIZIO						
Combinazione	N	M	V	σ_c	σ_s	Wk
	KN/m	kNm/m	KN/m	Mpa	Mpa	mm
SLE_RARA	30	45	43	-1	25	0

Per la verifica della mensola del muro paraghiaia in esame si può far riferimento a quanto già riportato per la spalla S1.

10.3 MURI LATERALI

In questo paragrafo si riporta il calcolo dei muri laterali della spalla. Tali muri sono sollecitati essenzialmente dalle spinte del terreno di riempimento all'interno della spalla e dei sovraccarichi presenti su di esso in condizioni statiche e sismiche.

Nella tabella che segue sono indicati parametri geometrici, meccanici e di carico utilizzati nell'analisi. Il modello di calcolo utilizzato è quello di mensola incastrata al muro frontale.

Tabella 42 – Valutazioni pesi e spinte agenti sui muri laterali

MURI LATERALI	
Muro laterale H1	4.00 m
Muro laterale s1	1.50 m
Muro laterale H2	3.60 m
Muro laterale s2	1.00 m
Muro laterale H3	2.53 m
Muro laterale s3	0.50 m
Altezza totale muri laterali	10.13 m
Spessore medio Muri Laterali	1.07 m
Lunghezza Massima muri laterali	7.00 m
Peso Muro laterale (singolo)	1901 kN
Peso totale Muri laterali	3803 kN
Spinta a riposo (con 100% sovraccarichi)	488.0 kN/m
Spinta a riposo (con 50% sovraccarichi)	449.1
Spinta attiva	292.8 kN/m
Coefficiente di spinta attiva con sismiche K'a	0.50
Incr. spinta attiva in condizione sismiche	279.7 kN/m
Inerzia del Muro laterale /m	81 kN/m

Tabella 43 – Geometria sezione e armatura dei muri laterali

Muro	Sezione di verifica		Armatura		
	Base [m]	Altezza [m]	Tesa	Compressa	Taglio

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 80 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	---------------	---------------	-----------	-------------------------

Laterale	1.0	1.5	1φ30/10	1φ26/20	Φ12/40x40
Laterale	1.0	1.0	1φ22/10	1φ20/20	Φ12/40x40
Laterale	1.0	0.5	1φ20/10	1φ20/20	Φ12/40x40

Tabella 44 – Verifiche dei muri laterali

VERIFICA DI RESISTENZA ALLO SLU/SLV						
Quota sez. di verifica [m]	Combinazione	N	M	V	C.S. (NRd, MRd)	C.S. (VRd)
		KN/m	kNm/m	KN/m		
0.00	SLU	367	2449	659	1.62	1.4
	SLV	272	2873	654	1.36	1.4
4.00	SLU	164	640	272	2.16	3.3
	SLV	122	679	251	2.00	3.6
7.60	SLU	43	71	65	6.88	13.8
	SLV	32	61	53	8.00	17.0

VERIFICHE DI ESERCIZIO							
Quota sez. di verifica [m]	Combinazione	N	M	V	σ _c	σ _s	Wk
		KN/m	kNm/m	KN/m	Mpa	Mpa	mm
0.00	SLE_RARA	272	1814	449	-58	181	0.12
4.00	SLE_RARA	122	474	169	-4	132	0.07
7.60	SLE_RARA	32	53	38	-1.5	31	0

10.4 PLINTO DI FONDAZIONE

In questo paragrafo si riporta la determinazione delle sollecitazioni in quota testa pali che si ottengono sommando, alle azioni provenienti dall'impalcato, la risultante e il momento risultante dei pesi della struttura, del terreno interno alla spalla e delle spinte dovute al rilevato rispetto al baricentro del plinto. In condizioni sismiche si è tenuto conto dell'incremento di spintadelle inerzie

Nella tabella che segue sono indicati i parametri geometrici, meccanici e di carico del plinto utilizzati nell'analisi per il calcolo della risultante e momento risultante rispetto al baricentro del plinto di fondazione. L'azione orizzontale derivante dall'impalcato è stata considerata sia con verso concorde che discorde alla spinta del terreno di rinterro.

Tabella 45 – Valutazioni pesi e spinte agenti sul plinto di fondazione

PLINTO DI FONDAZIONE	
Eccentricità long Muri laterali -Plinto	-2.5 m
Peso Muro Frontale	6175 kN
Ecc. Long. Muro Frontale - Plinto	2.25 m
Ecc.Appoggi Plinto	2.90 m
Peso Muro Paraghiaia	413 m
Ecc. Long. Muro Paraghiaia - Plinto	1.25 kN
Peso Terreno Interno	16721 kN
Peso Accidentali	2062 kN
Eccentricità long Terreno -Plinto	-2.5 m
Spessore Plinto	2.2 m

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id.doc.	N. prog.	Rev.	Pag. di Pag.
L0703	213	E	12	VI5700	REL	02	B	81 di 98

Lunghezza plinto	12	m
Larghezza plinto	14	m
Peso plinto di fondazione	9240	
<hr/>		
Altezza Rilevato+H plinto	12.36	m
Spinta a riposo rilevato	7633	kN
Spinta a riposo sovraccarichi	1235	kN
Spinta attiva rilevato	5489	kN
Incremento spinta sismica	5206	kN
Inerzia dei muri laterali (H)	1138	kN
Inerzia dei muri laterali (V)	569	kN
Inerzia plinto di fondazione (H)	2765	kN
Inerzia plinto di fondazione (V)	1382	kN
Inerzia rilevato interno(H)	5003	kN
Inerzia rilevato interno (V)	2501	kN

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 82 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	--------------------------

Tabella 46 – Sollecitazioni ad intradosso plinto (quota testa pali)

SOLLECITAZIONI BASE PLINTO							
Combo	N [kN]	V _L [kN]	V _T [kN]	M _L [kNm]	M _T [kNm]	M _{L,ΔM} [kNm]	M _{T,ΔM} [kNm]
ULS_A1_Gr1(max)	-59382	11972	84	24762	4150	64389	4428
ULS_A1_Gr1(min)	-55122	11972	87	12408	1351	52035	1639
ULS_A1_Gr2a(max)	-57348	11555	85	18305	3162	56553	3443
ULS_A1_Gr2a(min)	-54604	11555	87	10348	1281	48595	1569
ULS_A1_Gr2b(max)	-57297	11555	85	18158	3162	56405	3443
ULS_A1_Gr2b(min)	-54554	11555	87	10203	1281	48450	1569
SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	-40811	21571	3424	86090	19582	157489	30916
SLV-0.3Ex+Ey+0.3Ez	-40807	10313	11414	21556	65274	55693	103055
SLV-Ex+0.3Ey+Ez	-44871	10313	3424	22302	19582	56440	30916
SLS_RA_Gr1(max)	-43986	8868	56	18340	2998	47694	3183
SLS_RA_Gr1(min)	-40831	8868	58	9191	921	38544	1113
SLS_RA_Gr2a(max)	-42479	8559	57	13558	2268	41889	2456
SLS_RA_Gr2a(min)	-40447	8559	58	7665	869	35997	1061
SLS_RA_Gr2b(max)	-42442	8559	57	13451	2268	41782	2456
SLS_RA_Gr2b(min)	-40410	8559	58	7558	869	35889	1061
SLS_FR_Gr1(max)	-42442	8559	1	13451	1574	41782	1577
SLS_FR_Gr1(min)	-42442	8559	0	13451	1564	41782	1564
SLS_FR_Gr2a(max)	-42479	8559	1	13558	1574	41889	1577
SLS_FR_Gr2a(min)	-42479	8559	0	13558	1564	41889	1564
SLS_FR_Gr2b(max)	-42442	8559	1	13451	1574	41782	1577
SLS_FR_Gr2b(min)	-42442	8559	0	13451	1564	41782	1564
SLS_QP	-39074	7633	0	2445	0	27710	0

Per la valutazione delle sollecitazioni nel plinto di fondazione, è necessario valutare preventivamente le sollecitazioni agenti nei pali di fondazione. Tali sollecitazioni sono state valutate mediante una ripartizione rigida delle sollecitazioni agenti a base plinto. Nel calcolo degli sforzi nei pali si è tenuto del parametro α (vedi paragrafo 4) sia per la valutazione dello sforzo nei pali (effetto della deformabilità a taglio degli stessi pali) sia per la valutazione del momento flettente agente in testa al palo ($M_{Ed} = \alpha V_{Ed}$). La situazione peggiore risulta essere sempre quella sismica.

Si riportano nel seguito le coordinate dei pali di fondazione e per ogni combinazione di carico, le sollecitazioni nei pali sollecitati dal massimo e dal minimo sforzo normale.

Tabella 47 – Numero di pali e coordinate rispetto al baricentro del plinto

Pali									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
z	-4.50	0.00	4.50	-4.50	0.00	4.50	-4.50	0.00	4.50
y	5.50	5.50	5.50	0.00	0.00	0.00	-5.50	-5.50	-5.50
z ²	20.25	0.00	20.25	20.25	0.00	20.25	20.25	0.00	20.25
y ²	30.25	30.25	30.25	0.00	0.00	0.00	30.25	30.25	30.25
W _y	33.00	33.00	33.00	0.00	0.00	0.00	-33.00	-33.00	-33.00
W _z	-27.00	0.00	27.00	-27.00	0.00	27.00	-27.00	0.00	27.00

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 83 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	--------------------------

Tabella 48 – Massime e minime sollecitazioni nei pali di fondazione

SFORZI MASSIMI E MINIMI NEI PALI						
Combo	N _{min}		N _{max}		V _{max} [kN]	M _{max} [kNm]
	Palo	[kN]	Palo	[kN]		
ULS_A1_Gr1(max)	7	-7641	3	-5555	1330	4403
ULS_A1_Gr1(min)	7	-6625	3	-5624	1330	4403
ULS_A1_Gr2a(max)	7	-7146	3	-5598	1284	4250
ULS_A1_Gr2a(min)	7	-6489	3	-5645	1284	4250
ULS_A1_Gr2b(max)	7	-7135	3	-5598	1284	4250
ULS_A1_Gr2b(min)	7	-6478	3	-5645	1284	4250
SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	7	-8316	3	-753	2427	8033
SLV-0.3Ex+Ey+0.3Ez	7	-7310	3	-1758	1709	5658
SLV-Ex+0.3Ey+Ez	7	-6405	3	-3566	1207	3997
SLS_RA_Gr1(max)	7	-5657	3	-4117	985	3262
SLS_RA_Gr1(min)	7	-4905	3	-4168	985	3262
SLS_RA_Gr2a(max)	7	-5291	3	-4149	951	3148
SLS_RA_Gr2a(min)	7	-4804	3	-4184	951	3148
SLS_RA_Gr2b(max)	7	-5283	3	-4149	951	3148
SLS_RA_Gr2b(min)	7	-4796	3	-4184	951	3148
SLS_FR_Gr1(max)	7	-5262	3	-4170	951	3148
SLS_FR_Gr1(min)	7	-5261	3	-4170	951	3148
SLS_FR_Gr2a(max)	7	-5270	3	-4170	951	3148
SLS_FR_Gr2a(min)	7	-5269	3	-4170	951	3148
SLS_FR_Gr2b(max)	7	-5262	3	-4170	951	3148
SLS_FR_Gr2b(min)	7	-5261	3	-4170	951	3148
SLS_QP	1	-4432	3	-4251	848	2807

Il tacco anteriore del plinto di fondazione è stato verificato ipotizzando un meccanismo di tirante-puntone. Si riporta di seguito la verifica, eseguita in corrispondenza del palo più sollecitato (generalmente quello di spigolo).

Tabella 49 – Verifica dello zoccolo anteriore del plinto di fondazione con meccanismo tirante-puntone

VERIFICA DELLO ZOCCOLO ANTERIORE DEL PLINTO DI FONDAZIONE	
N _{max} (palo)	8316 kN
Dist. Asse palo-bordo muro frontale	1.00 m
Diametro palo	1.50 m
Larghezza di diffusione	3.00 m
Spessore della Fondazione	2.20 m
Copriferro nominale	0.05 m
Altezza utile della sezione	2.11 m
Altezza della biella compressa	0.4 m
Sforzo di Trazione	4924 kN
Sforzo di compressione	9665 kN
Diametro armatura primo strato	26 mm
Passo armatura primo strato	10 cm
Diametro armatura secondo strato	26 mm
Passo armatura secondo strato	20 cm
Area complessiva delle armature	23892 mm ²
Tensione nel calcestruzzo	7.6 Mpa
Tensione nell'acciaio	206.1 Mpa

Per quanto concerne la verifica della parte di plinto racchiusa dal muro frontale e dai muri laterali, si rimanda a quanto riportato per la spalla S1 soggetta a sollecitazioni più elevate.

10.5 PALI DI FONDAZIONE

Le sollecitazioni agenti nei pali di fondazione, sono state valutate mediante una ripartizione rigida delle sollecitazioni globali agenti a quota testa pali e in corrispondenza del baricentro del plinto di fondazione. Il valore del momento flettente agente in testa ai pali, è stato ottenuto moltiplicando il taglio in testa per il parametro “ α ” riportato al par. 4.3.

Si riportano di seguito le sollecitazioni e le verifiche di resistenza per le varie combinazioni di carico, e per i pali soggetti al massimo e al minimo sforzo normale.

L'individuazione dei pali a cui corrispondono tali sollecitazioni può essere effettuata mediante le tabelle riportate nel paragrafo precedente. Confrontando il massimo sforzo di compressione agente nei pali con i valori riportate nelle curve di capacità portante dei pali (vedi Relazione Geotecnica Generale sulle Opere all'aperto e Gallerie Artificiali), si è scelto di utilizzare dei pali aventi **lunghezza pari a 25 m**.

Le armature longitudinali consistono in una gabbia costituita da un primo strato di 20+20 ϕ 30 ed un secondo strato di 20 ϕ 30 longitudinali e da una spirale ϕ 14/10 prevedendo una opportuna riduzione lungo il fusto del palo.

Tabella 50 – Verifica dei pali di fondazione

Palo	Sezione di verifica	Armatura	
	D [m]	Armatura longitudinale	Taglio
Φ 1500	1.5	20+20 ϕ 30 - 20 ϕ 30	Spirale ϕ 14/10

PALO - Verifiche allo SLU						
Combinazioni		N kN	Mlong kNm	Tlong kN	C.S. (NRd, MRd)	C.S. (VRd)
Max N	SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	-8316	8033	2427	1.38	1.3
Min N	SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	-753	8033	2427	1.1	1.3
Max VL	SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	-753	8033	2427	1.1	1.3

PALO - Verifiche allo SLE							
Combinazioni		N	Mlong	Tlong	σ_c	σ_s	Wk
		kN	kNm	kN	Mpa	Mpa	mm
RARA	SLS_RA_Gr1(max)	-5657	3262	985	-9.7	82.8	-
	SLS_RA_Gr1(max)	-4117	3262	985	-9.4	111.1	-
FREQ	SLS_FR_Gr2a(max)	-5270	3148	951	-9.3	83.2	-
	SLS_FR_Gr1(max)	-4170	3148	951	-9.1	103.3	-
QP	SLS_QP	-4432	2807	848	-8.2	78.8	-
	SLS_QP	-4251	2807	848	-8.2	82.1	-

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 85 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

10.5.1 Verifiche geotecniche di capacità portante

Confrontando il massimo sforzo di compressione agente nei pali con i valori riportate nelle curve di capacità portante dei pali (vedi Relazione Geotecnica Generale sulle Opere all'aperto e Gallerie Artificiali), si è scelto di utilizzare dei pali aventi le seguenti lunghezze:

PALI S.ANNA - SPALLE (N>O COMPRESSIONE)													PORTANZA VERTICALE SPALLE - COMB. A1-M1-R3					
SPALLA	L _{imp}	H _{muro front}	D _{pali}	n°pali	L _{pali}	N _{max,SLU}	N _{max,SLV}	N _{max,SLE}	N _{min,SLU}	N _{min,SLV}	V _{max}	M _{max}	Qd,c	FS	QLL	FS	Qd,t	FS
	[m]	[m]	[m]	[-]	[m]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[-]	[kN]	[-]	[kN]	[-]
FISSA	25.00	6.70	1.50	9	25	6838	7786	5063	4503	163	2354	7790	8740	1.12	10034	1.98	5373	-
MOBILE	25.00	7.60	1.50	9	25	7641	8316	5657	5555	753	2427	8033	8740	1.05	10034	1.77	5873	-

11. VERIFICA DELLE PILE

Le sollecitazioni di verifica della pila sono state determinate a partire dai valori delle risultanti delle azioni trasmesse dagli impalcati alla quota degli apparecchi di appoggio.

Essendo l'impalcato vincolato allo stesso modo su tutte le pile, si riportano le verifiche strutturali con riferimento alla pila maggiormente sollecitata, ovvero la pila P2:

- P2, H=12.8 m (i risultati sono validi anche per la pila P1 e P3, H=11.8 e 12.8 m);

Le pile presentano un fusto a sezione cava di dimensione 7.0 x 3.0 m. La pila è fondata su un plinto a 6 pali $\Phi 1500$, di spessore 2.50 m, larghezza 12 m e lunghezza 7.5 m.

Le altezze della pila riportate in tabella sono comprensive dell'altezza del pulvino pari a 2,4m.

11.1 RISULTATI DELLE ANALISI E VERIFICHE DEL FUSTO

Neli seguenti paragrafi si riportano i diagrammi di sollecitazione della pile in esame e le relative verifiche in condizioni ultime e di esercizio. Le sollecitazioni sono espresse secondo gli assi locali degli elementi monodimensionali, secondo la seguente convenzione:

- F_x = sforzo normale (espresso in kN);
- M_y = momento longitudinale (kNm);
- M_z = momento trasversale (kNm);
- S_z = taglio longitudinale (kN);
- S_y = taglio trasversale (kN).

Le armature a base pila utilizzate ai fini delle verifiche sono riepilogati nella tabella seguente:

PILA	$L_{imp,sx}$	H_{pila}	$L_{imp,dx}$	Arm Long base		Arm taglio base	
	[m]	[m]	[m]	est	int	dir X (long)	dir y (trasv)
P1	25.00	11.80	25.00	ϕ 22/10 cm	ϕ 20/20 cm	4 ϕ 14/10cm	6 ϕ 14/10cm
P2	25.00	12.80	25.00	ϕ 22/10 cm	ϕ 20/20 cm	4 ϕ 14/10cm	6 ϕ 14/10cm
P3	25.00	11.80	25.00	ϕ 22/10 cm	ϕ 20/20 cm	4 ϕ 14/10cm	6 ϕ 14/10cm

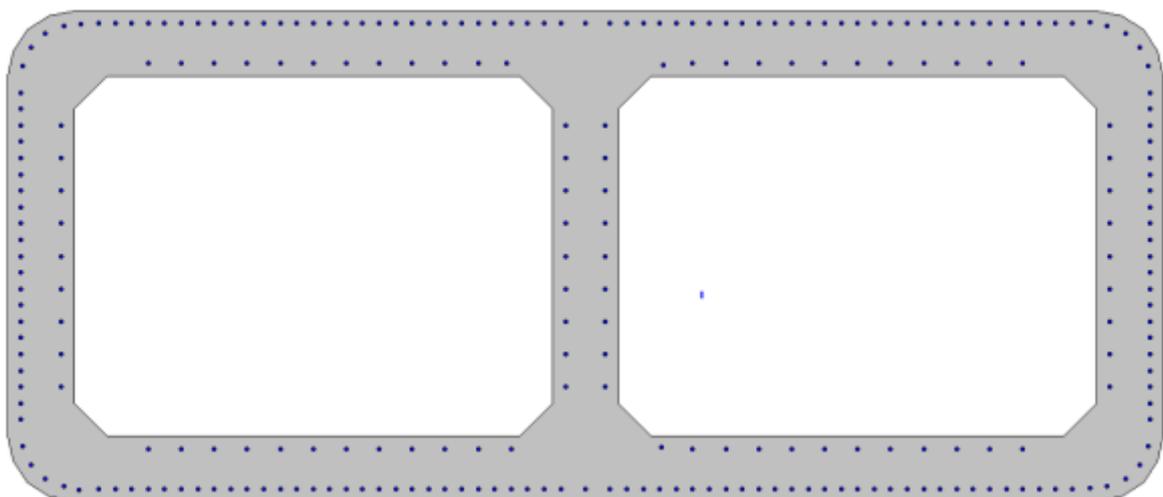


Figura 37 – Sezione trasversale pile

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N,prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 87 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	--------------------------

I domini di resistenza M-N e i coefficienti di sicurezza a pressoflessione sono ottenuti attraverso il software commerciale PresFle+ distribuito dalla Concrete.

Il valore dei tagli resistenti è stato ricavato attraverso un apposito foglio di calcolo realizzato in accordo con il D.M. 14/01/2008 p.to 4.1.2.1.3.2, considerando la sezione trasversale alla base armata a taglio con armatura con barre $\phi 14/10$ in direzione longitudinale (6 bracci resistenti) e trasversale (4 bracci) e considerando, cautelativamente, una sezione rettangolare equivalente di dimensioni HxB 7.0x0.80 in direzione trasversale e 3.0x1.20 in direzione longitudinale.

11.1.1 Risultati e verifiche agli SLU/SLV

Nel seguente paragrafo si riportano le tabelle riepilogative di verifiche a quota spiccato pila (estradosso plinto) per le combinazioni di carico allo SLU e le relative verifiche di resistenza a pressoflessione e taglio.

Tabella 51 - PILA P2 : Verifiche agli SLU/SLV a pressoflessione e taglio (base pila)

VERIFICHE PILA SLU								
Combinazione	N [kN]	ML [kNm]	MT [kNm]	F,S,	VL [kN]	VT [kN]	(F,S,)L	(F,S,)T
ULS_A1_Gr1(max)	20235.4	0.0	8804.4	7.4	0.0	168.0	-	>100
ULS_A1_Gr1(min)	11715.4	0.0	3223.2	12.7	0.0	174.0	-	>100
ULS_A1_Gr2a(max)	17559.4	0.0	6834.0	8.5	0.0	170.0	-	>100
ULS_A1_Gr2a(min)	12071.4	0.0	3083.2	12.4	0.0	174.0	-	>100
ULS_A1_Gr2b(max)	17457.4	0.0	6834.0	8.6	0.0	170.0	-	>100
ULS_A1_Gr2b(min)	11971.4	0.0	3083.2	12.5	0.0	174.0	-	>100
SLV-Ex+0,3Ey+0,3Ez	8715	20734.4	7213.0	2.9	2030.1	667.4	6.5	31.0
SLV-0,3Ex+Ey+0,3Ez	8715	6220.3	24043.4	5.2	609.0	2224.8	21.7	9.3
SLV-0,3Ex+0,3Ey+Ez	7863	6220.4	7213.0	9.2	609.0	667.4	21.7	31.0

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N,prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 88 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	--------------------------

11.1.2 Risultati e verifiche agli SLE

Nel seguente paragrafo si riportano le tabelle riepilogative di verifiche a quota spiccato pila (estradosso plinto) per le combinazioni di carico allo SLE e le relative verifiche di esercizio. In particolare, i valori delle tensioni in esercizio nel calcestruzzo e nelle barre di armatura e i valori di apertura delle fessure sono stati ricavate attraverso il software commerciale *PresFLE+* distribuito dalla *Concrete*. In particolare, in accordo con la Circolare 617 del 02/02/2009 p.to C4.1.2.2.4.6, il software esegue il calcolo della deformazione media delle barre e della distanza media tra le fessure utilizzando la procedura del D.M. 09/01/1996.

Tabella 52 – Pila P2: Verifiche agli SLE (base pila)

VERIFICHE PILA SLE								
Combinazione	N	ML	MT	LIMITAZIONE DELLE TENSIONI IN ESERCIZIO				FESSUR,
				$\sigma_{c,min}$	F,S,	$ \sigma_s _{max}$	F,S,	w_k
				[MPa]		[MPa]		[MPa]
	[kN]	[kNm]	[kNm]					
SLS_FR_Gr1(max)	12932.0	0.0	3153.6	-1.56	11.5	-16.7	21.5	0.00
SLS_FR_Gr1(min)	12932.0	0.0	3128.0	-1.56	11.5	-16.8	21.5	0.00
SLS_FR_Gr2a(max)	13006.0	0.0	3153.6	-1.57	11.5	-16.8	21.4	0.00
SLS_FR_Gr2a(min)	13006.0	0.0	3128.0	-1.57	11.5	-16.9	21.3	0.00
SLS_FR_Gr2b(max)	12932.0	0.0	3153.6	-1.56	11.5	-16.7	21.5	0.00
SLS_FR_Gr2b(min)	12932.0	0.0	3128.0	-1.56	11.5	-16.8	21.5	0.00
SLS_QP	9290.0	0.0	0.0	-0.96	18.8	-14.4	25.0	0.00
SLS_RA_Gr1(max)	14988.0	0.0	6331.6	-2.01	6.7	-16.6	21.7	-
SLS_RA_Gr1(min)	8678.0	0.0	2190.8	-1.05	12.9	-11.2	32.3	-
SLS_RA_Gr2a(max)	13006.0	0.0	4877.2	-1.7	7.9	-15.0	24.0	-
SLS_RA_Gr2a(min)	8942.0	0.0	2086.8	-1.07	12.6	-11.7	30.8	-
SLS_RA_Gr2b(max)	12932.0	0.0	4877.2	-1.69	8.0	-14.9	24.1	-
SLS_RA_Gr2b(min)	8868.0	0.0	2086.8	-1.07	12.6	-11.7	30.8	-

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

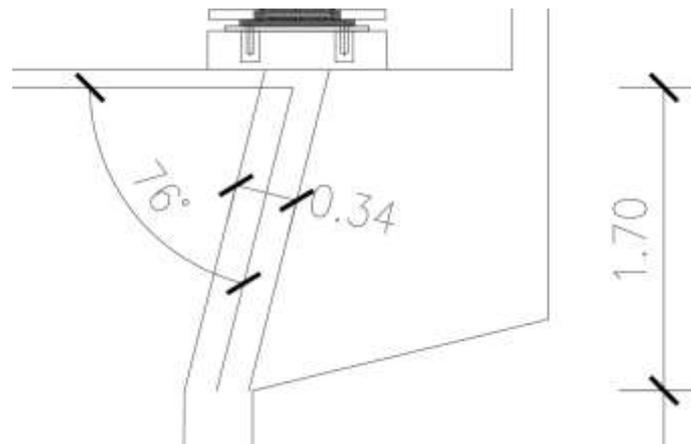
OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag.di Pag. 89 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	-------------------------

11.2 PULVINO

Per la verifica del pulvino è stato considerato uno schema a traliccio tirante-puntone in direzione trasversale. L'altezza della biella compressa è stata valutata pari a $0.2d$ (d = altezza utile del pulvino). Il massimo scarico sugli appoggi allo SLU è pari a 2965 kN circa cautelativamente si assume 3000 kN.



Si ricavano le sollecitazioni nel tirante e nel puntone secondo le seguenti espressioni:

$$C = \frac{R}{\sin\theta}$$

$$T = C \cos\theta$$

Considerando, cautelativamente, che tali sforzi si ripartiscano su una fascia di larghezza $b = 1.0$ m, il tirante è costituito da $2\phi 22/15$, per cui le tensioni massime nei tiranti e nei puntoni sono pari a:

N =		3000 kN	Scarico massimo appoggi
d =		1.70 m	
$\theta =$		76 °	
b =		1 m	Larghezza di diffusione
C =	N/sen θ	3092 kN	Compressione Biella
T =	C · cos θ	748 kN	

As =		5068.4 mmq	Armatura superiore fascia	$2\phi 22/15$
$\sigma_c =$	C/(0.2d · b)	3.64 MPa	Tensione di compressione biella	< fcd
$\sigma_s =$	T/As	147.6 MPa	Tensione massima trazione armatura	< fyd

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 90 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

11.3 PALI DI FONDAZIONE

11.3.1 Sollecitazioni testa pali

Le sollecitazioni agenti nei pali di fondazione, sono state valutate mediante una ripartizione rigida delle sollecitazioni globali agenti a quota testa pali e in corrispondenza del baricentro del plinto di fondazione. Il valore del momento flettente in testa ai pali, è stato ottenuto moltiplicando il taglio in testa per il parametro “ α ” riportato al par. 4.3.

Di seguito si riporta la valutazione, secondo i criteri esposti precedentemente, delle azioni nei pali di fondazione delle pile:

Tabella 53 – Pile: Numero di pali e coordinate rispetto al baricentro del plinto

	Pali					
	1	2	3	4	5	6
z	2.25	2.25	2.25	-2.25	-2.25	-2.25
y	-4.50	0.00	4.50	-4.50	0.00	4.50
z²	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
y²	20.3	0.0	20.3	20.3	0.0	20.3
W_y	-18.0	0.0	18.0	-18.0	0.0	18.0
W_z	13.5	13.5	13.5	-13.5	-13.5	-13.5

Tabella 54 – Pila P2: Sollecitazioni a base plinto e sforzi massimi e minimi nei pali (tali azioni sono comprensive dell'azione della frana in direzione trasversale al viadotto)

AZIONI FRANA			Frana	
peso terreno frana =	19	kN/mc	γ_{SLU}	1.35
Spessore coltre frana =	5.0	m	γ_{SLV}	1.00
Direz. Frana =	Trasversale		L= 7.5 m	γ_{SLE} 0.00
coeff. di spinta =	riposo			
Spinta =	164.11	kN/m		
Taglio testa pali =	1230.813	kN		

SOLLECITAZIONI BASE PLINTO							
Combo	N [kN]	M _L [kNm]	M _T [kNm]	V _L [kN]	V _T [kN]	M _{L,ΔM} [kNm]	M _{T,ΔM} [kNm]
ULS_A1_Gr1(max)	27829.15	0	9224.4	0	1830	0	15280
ULS_A1_Gr1(min)	19309.15	0	3658.2	0	1836	0	9734
ULS_A1_Gr2a(max)	25153.15	0	7259	0	1832	0	13322
ULS_A1_Gr2a(min)	19665.15	0	3518.2	0	1836	0	9594
ULS_A1_Gr2b(max)	25051.15	0	7259	0	1832	0	13322
ULS_A1_Gr2b(min)	19565.15	0	3518.2	0	1836	0	9594
SLV-0.3Ex+Ey+0.3Ez	15307	27926	9517	3723	2406	40250	17481
SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	15307	8378	31722	1117	5149	12075	48764
SLV-Ex+0.3Ey+Ez	16711	8378	9517	1117	2406	12075	17481
SLS_FR_Gr1(max)	18557	0	3159	0	2	0	3165
SLS_FR_Gr1(min)	18557	0	3128	0	0	0	3128
SLS_FR_Gr2a(max)	18631	0	3159	0	2	0	3165
SLS_FR_Gr2a(min)	18631	0	3128	0	0	0	3128
SLS_FR_Gr2b(max)	18557	0	3159	0	2	0	3165



2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

	Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 91 di 98
SLS_FR_Gr2b(min)	18557	0	3128	0	0	0	0	3128	
SLS_QP	14915	0	0	0	0	0	0	0	
SLS_RA_Gr1(max)	20613	0	6612	0	112	0	0	6982	
SLS_RA_Gr1(min)	14303	0	2481	0	116	0	0	2865	
SLS_RA_Gr2a(max)	18631	0	5162	0	114	0	0	5540	
SLS_RA_Gr2a(min)	14567	0	2377	0	116	0	0	2761	
SLS_RA_Gr2b(max)	18557	0	5162	0	114	0	0	5540	
SLS_RA_Gr2b(min)	14493	0	2377	0	116	0	0	2761	

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 2B	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N,prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 92 di 98
----------------	--------------	--------------	-----------	---------------	----------------	---------------	-----------	--------------------------

SFORZI MASSIMI E MINIMI NEI PALI						
Combo	N _{min}		N _{max}		V _{max} [kN]	M _{max} [kNm]
	Palo	[kN]	Palo	[kN]		
ULS_A1_Gr1(max)	1	3789	3	5487	305	1009
ULS_A1_Gr1(min)	1	2677	3	3759	306	1013
ULS_A1_Gr2a(max)	1	3452	3	4932	305	1010
ULS_A1_Gr2a(min)	1	2745	3	3811	306	1013
ULS_A1_Gr2b(max)	1	3435	3	4915	305	1010
ULS_A1_Gr2b(min)	1	2728	3	3794	306	1013
SLV-0.3Ex+Ey+0.3Ez	4	-1401	3	6504	739	2446
SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	4	-1052	3	6155	878	2906
SLV-Ex+0.3Ey+Ez	4	920	3	4651	442	1463
SLS_FR_Gr1(max)	1	2917	3	3269	0	1
SLS_FR_Gr1(min)	1	2919	3	3267	0	0
SLS_FR_Gr2a(max)	1	2929	3	3281	0	1
SLS_FR_Gr2a(min)	1	2931	3	3279	0	0
SLS_FR_Gr2b(max)	1	2917	3	3269	0	1
SLS_FR_Gr2b(min)	1	2919	3	3267	0	0
SLS_QP	1	2486	1	2486	0	0
SLS_RA_Gr1(max)	1	3048	3	3823	19	62
SLS_RA_Gr1(min)	1	2225	3	2543	19	64
SLS_RA_Gr2a(max)	1	2797	3	3413	19	63
SLS_RA_Gr2a(min)	1	2274	3	2581	19	64
SLS_RA_Gr2b(max)	1	2785	3	3401	19	63
SLS_RA_Gr2b(min)	1	2262	3	2569	19	64

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc REL	N.prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 93 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	---------------	---------------	-----------	--------------------------

11.3.2 Verifiche geotecniche di capacità portante

Confrontando il massimo sforzo di compressione agente nei pali con i valori riportate nelle curve di capacità portante dei pali (vedi Relazione Geotecnica Generale sulle Opere all'aperto e Gallerie Artificiali), si è scelto di utilizzare dei pali aventi le seguenti lunghezze:

PALI S.ANNA - PILE (N>0 COMPRESSIONE)														PORTANZA VERTICALE - COMB. A1-M1-R3					
PILA	H _{pila}	L _{imp,sx}	L _{imp,dx}	D _{pali}	n°pali	L _{pali}	N _{max,SLU}	N _{max,SLV}	N _{max,SLE}	N _{min,SLU}	N _{min,SLV}	V _{max}	M _{max}	Qd,c	FS	QLL	FS	Qd,t	FS
	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[-]	[kN]	[-]	[kN]
P1	11.80	25.00	25.00	1.50	6	21	5125	5952	3782	2083	-920	664	2199	6579	1.11	6829	1.81	3763	4.1
P2	12.80	25.00	25.00	1.50	6	21	5487	6504	3823	1825	-1401	878	2906	6579	1.01	6829	1.79	3763	2.7
P3	11.80	25.00	25.00	1.50	6	21	5431	6178	3782	1778	-1146	864	2859	6579	1.06	6829	1.81	3763	3.3

11.3.3 Verifiche strutturale pali

Si riportano di seguito le verifiche strutturali agli SLU e SLE per il palo più sollecitato appartenente alla pila P2.

Le armature longitudinali consistono in una gabbia costituita da 20+20φ26 longitudinali e da una spirale φ12/10 prevedendo una opportuna riduzione lungo il fusto del palo.

PALO - Verifiche allo SLU/SLV						
Combinazioni		N kN	Mlong kNm	Tlong kN	C.S. (NRd, MRd)	C.S. (VRd)
Max N	SLV-0.3Ex+Ey+0.3Ez	-1401	2446	739	1.48	3.23
Min N	SLV-0.3Ex+Ey+0.3Ez	6504	2446	739	2.87	3.23
Max VL	SLV-Ex+0.3Ey+0.3Ez	6155	2906	878	2.38	2.72

PALO - Verifiche allo SLE							
Combinazioni		N	Mlong	Tlong	σ _c	σ _s	Wk
		kN	kNm	kN	Mpa	Mpa	mm
RARA	SLS_RA_Gr1(min)	2225	64	19	-1.2	-14.1	0.0
	SLS_RA_Gr1(max)	3823	62	19	-2.0	-25.7	0.0
FREQ	SLS_QP	2486	0	0	-1.2	-18.0	0.0
	SLS_FR_Gr2a(max)	3281	1	0	-1.6	-23.7	0.0
QP	SLS_QP	2486	0	0	-1.2	-18.0	0.0

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 94 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

11.4 PLINTO

Stanti i rapporti dimensionali esistenti tra zattera di fondazione e ingombro del fusto pila, per il calcolo delle sollecitazioni e relativa verifica delle sezioni, è stato considerato un modello di calcolo a tirante-puntone in direzione obliqua (mensola tozza) sottoposta alla massima reazione verticale del palo di spigolo. La verifica è condotta con riferimento al plinto maggiormente sollecitato, ovvero quello relativo alla pila 2.

VERIFICA DELLO ZOCCOLO ANTERIORE DEL PLINTO DI FONDAZIONE

Nmax (palo)	6504	kN
Dist. Asse palo (spigolo) -fusto	2.00	m
Diametro palo	1.50	m
Larghezza di diffusione	3.00	m
Spessore della Fondazione	2.50	m
Copriferro nominale (su baricentro armature)	0.180	m
Altezza utile della sezione	2.29	m
Altezza della biella compressa	0.5	m
Sforzo di Trazione	7088	kN
Sforzo di compressione	9620	kN
Diametro armatura primo strato	26	mm
Passo armatura primo strato	15	cm
Diametro armatura secondo strato	26	mm
Passo armatura secondo strato	15	cm
Diametro armatura secondo strato	0	mm
Passo armatura secondo strato	15	cm
Area complessiva delle armature	21237	mm ²
Tensione nel calcestruzzo	7.0	Mpa
Tensione nell'acciaio	333.7	Mpa

Le tensioni sono inferiori ai limiti dei materiali. Pertanto le verifiche sono soddisfatte.

12. ISOLATORI, APPOGGI E GIUNTI

Nel seguente paragrafo si illustrano le caratteristiche degli isolatori sismici, degli apparecchi di appoggio e dei giunti in corrispondenza delle spalle.

Il ponte è dotato di un sistema di isolamento sismico sia in direzione trasversale che longitudinale. In particolare gli apparecchi di appoggio sono previsti tutti del tipo multidirezionali e pertanto i vincoli orizzontali sono costituiti dai dispositivi di isolamento.

Nella figura successiva, viene riportato lo schema relativo alla sistemazione dei dispositivi di isolamento e apparecchi di appoggio. Con la sigla "T" si indicano gli apparecchi d'appoggio, scorrevoli longitudinalmente e trasversalmente e dotati di dispositivi sismici in direzione trasversale, distinguendo con T1 i dispositivi sulle spalle e T2 i dispositivi sulle pile; con la sigla "L" si indicano, invece, gli isolatori sismici in direzione longitudinale, posizionati sulla spalla fissa.

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 95 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

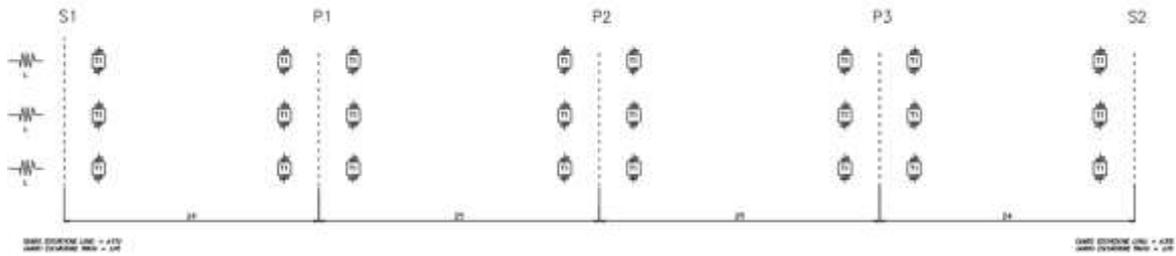


Figura 38 – Schema di appoggi e isolatori

In entrambe le direzioni, i dispositivi sismici sono del tipo elastoplastico e cioè costituiti da elementi di acciaio opportunamente dimensionati e sagomati in modo da presentare una rigidezza iniziale sufficientemente elevata e un comportamento plastico con lieve incrudimento per carichi superiori al carico di snervamento del dispositivo.

Il comportamento del dispositivo è del tipo isteretico con scarico elastico e i dati di progetto del dispositivo sono costituiti dalle coppie forza- spostamento all'atto dello snervamento ($F1, d1$) e in corrispondenza dei valori massimi previsti in presenza di azione sismica ($F2, d2$).

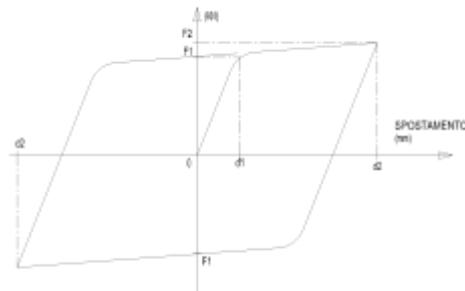


Figura 39 – Legame forza-spostamento per isolatori

Si evidenzia che il valore di soglia $F1$ garantisce un adeguato margine nei confronti delle azioni statiche e che le deformazioni termiche, nella direzione trasversale, comportano spostamenti trascurabili e contenuti nelle tolleranze del dispositivo.

Per il viadotto in esame i dati di progetto dei dispositivi sono stati valutati precedentemente e sono sinteticamente riportati nella tabella successiva.

Tabella 55 – Caratteristiche tecniche appoggi isolatori longitudinali e trasversali

CARATTERISTICHE TECNICHE APPOGGI-ISOLATORI LONGITUDINALI E TRASVERSALI											
SIGLA	CARICO VERTICALE [kN]	ESCURSIONI		F1		F2		D1		D2	
		LONG. [mm]	TRASV. [mm]	LONG. [kN]	TRASV. [kN]	LONG. [kN]	TRASV. [kN]	LONG. [mm]	TRASV. [mm]	LONG. [mm]	TRASV. [mm]
L	-	-	-	570	-	660	-	±15	-	±135	-
T1	3000	±150/300	± 70	-	160	-	190	-	± 6	-	± 60
T2	3000	±150/300	± 70	-	160	-	190	-	± 6	-	± 60

Gli apparecchi di appoggio, sono del tipo in acciaio teflon con disco elastomerico confinato. La tipologia costruttiva prevista per gli apparecchi di appoggio, degli isolatori e dei giunti è riportata nell'elaborato grafico specifico.

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS VI5700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 96 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

Di seguito si riporta la valutazione delle corse degli apparecchi di appoggio multidirezionali e l'escursione dei giunti sulle due spalle in direzione trasversale e longitudinale.

Direzione trasversale

Le analisi dinamiche non lineari mediante accelerogrammi indicano valori massimi contenuti in 60 mm, mentre dall'analisi dinamica lineare si è ottenuto uno spostamento di 60 mm.

La corsa trasversale degli apparecchi di appoggio è quindi fissata pari a ± 70 mm.

Direzione longitudinale

Sono stati valutati i seguenti spostamenti:

- 6) spostamento relativo massimo longitudinale dell'isolatore in corrispondenza della spalla sismica d_2 ;
- 7) spostamento relativo massimo tra la spalla fissa e la spalla mobile per effetto di moto sismico asincrono tra le spalle d_g .
- 8) spostamento relativo massimo dell'impalcato per effetto delle variazioni termiche d_t ;

In corrispondenza della spalla fissa, la corsa degli apparecchi di appoggio e l'escursione del giunto è pari a:

- $\Delta_{sp,f} = \pm d_2$

In corrispondenza della spalla mobile, la corsa degli apparecchi di appoggio e l'escursione del giunto è pari a:

- $\Delta_{sp,m} = \pm (d_2 + d_g + d_t)$

Lo spostamento d_2 è stato valutato pari a 135 mm con analisi lineare e a 126 mm con analisi dinamica non lineare. Pertanto si adotta il valore:

- $d_2 = \pm 135$ mm

Gli spostamenti dovuti alla dilatazione termica e al moto sismico asincrono (allo SLC) tra le spalle possono essere valutati come segue:

- $d_g = 0.025 \cdot S \cdot T_C \cdot T_D \cdot a_g = 0.025 \cdot 1.36 \cdot 0.51 \cdot 2.71 \cdot 0.277 \cdot 9.81 \cdot 10^3 = 128$ mm
- $d_t = \alpha \cdot \Delta T \cdot L = 1 \cdot 10^{-5} \cdot 20 \cdot 100 \cdot 10^3 = 20$ mm

Pertanto lo spostamento massimo in corrispondenza della spalla mobile vale circa ± 283 mm.

Sono state adottate corse longitudinali degli apparecchi di appoggio pari a ± 150 mm per la spalla fissa e ± 300 mm per la spalla mobile.

Per i giunti di estremità sono stati adottati giunti con escursioni pari a ± 300 mm in corrispondenza di entrambe le spalle.

13. VERIFICA DEI BAGGIOLI

Il dimensionamento delle armature nei baggioli previsti per l'alloggiamento degli apparecchi di appoggio sono condotti in base a quanto riportato nell'Eurocodice 2 del 1990 e/o nel Model Code CEB-FIP 1990, secondo un meccanismo resistente tipo "shear-friction".

Le formulazioni utilizzate sono in particolare, quelle di cui al P.to 6.10 - CEB-FIP Model Code 1990, per la valutazione della resistenza alle azioni orizzontali, ovvero quella del (P.to 6.7 - EC2 parte 1-1) per il calcolo della resistenza per azioni verticali.

Di seguito si riportano i risultati delle verifiche effettuate in accordo alle formulazioni citate per il baggiolo maggiormente sollecitato:

PORTATA APPOGGI (KN)			
TIPO	V	H _L	H _T
APPOGGIO	3000	0	200

Materiali			
Calcestruzzo			
Resistenza caratteristica cubica	R _{ck} =	37	MPa
Resistenza caratteristica cilindrica	f _{ck} =0,83*R _{ck} =	30	MPa
Resistenza a compressione di calcolo	f _{cd} =f _{ck} /γ _c =	19.73	MPa
Resistenza a trazione media	f _{ctm} =0.27*(R _{ck}) ^{2/3} =	3.00	MPa
Resistenza caratteristica a trazione	f _{ctk} =0.7*f _{ctm} =	2.10	MPa
Resistenza car. a trazione per flessione	f _{ctk} =1.2*f _{ctm} =	3.60	MPa
Resistenza a trazione di calcolo	f _{ctd} =f _{ctk} /γ _c =	1.40	MPa
Acciaio			
Tensione caratteristica di snervamento	f _{yk} =	450	MPa
Tensione di snervamento di calcolo	f _{yd} =f _{yk} /γ _s =	391	MPa
Dimensioni piastre inferiore appoggi		a (long.)	b (trasv.)
Appoggio		990	700
Tipo e dimensioni baggioli		a' (long.)	b' (trasv.)
Baggiolo		1000	1000
VERIFICHE STRUTTURALI DEL BAGGIOLO			
Resistenza alle forze orizzontali (P.to 6.10 - CEB-FIP Model Code 1990)			
Azione tagliante ultima	F _{sd} =(H _L ² +H _T ²) ^{1/2} =	200	KN
Utilizzando un meccanismo resistente di shear-friction si ottiene:			
μ=0.6 (coefficiente di attrito cls-cls)			
β=0.2, essendo βf _{ctd} la coesione del calcestruzzo (resistenza per attrito)			
σ _{cd} =tensione di compressione dovuta ai carichi esterni			
La condizione di resistenza al taglio si esprime con la:			
τ _{sd} <τ _{rd}	7.40	MPa	
τ _{rd} =βf _{ctd} +μ(ρf _{yd} +σ _{cd})<0.25f _{cd}	0.25 f _{cd} =	4.93	MPa
Trascurando l'influenza dell'attrito e della tensione di compressione σ _{cd} si ha:			
Num. ferri :	52		
Diametro singolo ferro:	22	mm	
Area complessiva A _s =	19767	mm ²	
Perc. di armatura ρ=	0.01977	(≥0.001)	OK
Resistenza a taglio teorica	τ _{rd} =	4.64	N/mm ²
Resistenza a taglio di calcolo	τ _{rd} =	4.64	N/mm ²
Taglio agente di progetto	τ _{sd} =	0.20	N/mm ² OK

2.1.3 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord – Castelraimondo sud

4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud – innesto S.S. 77 a Muccia

OPERE D'ARTE MAGGIORI: VIADOTTO S. Anna

Relazione di calcolo sottostrutture

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 12	WBS V15700	Id.doc. REL	N. prog. 02	Rev. B	Pag. di Pag. 98 di 98
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	----------------	----------------	-----------	--------------------------

Resistenza alle forze verticali (P.to 6.7 - EC2 parte 1-1)

Azione di progetto ultima	$F_{sdu}=V=$	3000	KN
area caricata $A_{c0}=$		693000	mm ²
massima area di diffusione $A_{c1}=$		1000000	mm ²
Resistenza ultima $F_{rdU}=A_{c0}*f_{cd}*(A_{c1}/A_{c0})^{1/2}=$		16427.33	KN
$F_{rdU} < 3*f_{cd}*A_{c0} =$	41025.6 kN	OK	

Armatura di frettaggio per assorbire la reazione verticale

Azione di progetto ultima	$F_{sdu}=V=$	3000	KN
Area necessaria $A_s=0.25*F_{sdu}*(1-(\min(a/a'-b/b')))/f_{yd}=$		6	cm ²
Avendo disposto staffe $\phi 22$ e $\phi 12$ a 4 braccia e considerando 2 staffe collaboranti risulta			
	Area resistente totale	39.4	cm ²
		OK	